

电力系统中量子信息学的应用现状及展望

谢海鹏, 钱雨琦, 付炜, 王信, 别朝红*

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Status and Prospect of Quantum Informatics in Power Systems

XIE Haipeng, QIAN Yuqi, FU Wei, WANG Xin, BIE Zhaohong*

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University),

Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: The quantum informatics has unique advantages in information acquisition, transmission and processing, etc., and has great potential in ensuring information security of new power systems and alleviating computational difficulties. In this paper, the research status of quantum informatics in the context of power system applications is summarized from two aspects of quantum communication and quantum computing, and the possible research directions in the future are prospected. First, the basic concepts and principles of quantum informatics are introduced. Then, for quantum communication, the applicability of representative quantum communication technologies in new power systems is analyzed. The research status of quantum communication in power systems is generalized in four aspects: long-distance information transmission, multi-user communication, unified standards and dedicated research platforms. For quantum computing, the basic principles of quantum computing methods and their research status in power systems are summarized from the aspects of linear algebraic operations, optimization problem solving, machine learning and parameter estimation. Finally, the application of quantum informatics in new power systems is prospected, and the development suggestions of quantum informatics in power systems are put forward.

KEY WORDS: quantum informatics; new power system; quantum communication; quantum computing; quantum derivative algorithm

摘要: 量子信息学在信息获取、传输和处理等方面具有独特优势,在保障新型电力系统信息安全和纾解算力困境等方面潜力巨大。从量子通信和量子计算2个方面,总结了电力系统应用背景下的量子信息学研究现状,并对未来可能的研究

方向进行了展望。首先,介绍了量子信息学的基本概念和原理。然后,针对量子通信,分析了典型量子通信技术在新型电力系统中的适用性,并从远距离信息传输、多主体通信、统一标准化和专用研发平台4个方面梳理电力系统中量子通信的研究现状;针对量子计算,从线性代数运算、优化问题求解、机器学习和参数估计等方面阐述归纳了量子算法的基本原理及其在电力系统中的研究现状。最后,面向新型电力系统中量子信息学的应用前景进行了展望,并提出了电力系统中量子信息学的发展建议。

关键词: 量子信息学; 新型电力系统; 量子通信; 量子计算; 量子衍生算法

0 引言

构建新型电力系统是实现“双碳”目标和推动能源转型的必然要求^[1]。相比传统电力系统,新型电力系统面临的不确定性将大幅提升,运行机理也将更为复杂^[2-3],亟需借助最新的信息技术,提升电力系统对信息的可靠获取、安全传输和高效处理能力^[4-6],以支撑新型电力系统的安全、经济运行。而量子信息学在通信安全和高效计算方面的潜力令人瞩目,将有望在新型电力系统发展中发挥关键支撑作用。

量子信息学是一门新兴的、以量子力学与经典信息学理论为基础的交叉学科,能够利用量子力学的基本特性对信息进行经典意义上不可行的操作,形成了全新的通信方式和计算模式,包含量子通信和量子计算等领域^[7]。近年来,量子信息学发展迅速并得到广泛认可,2022年诺贝尔物理学奖即授予3位对量子信息学做出开创性贡献的科学家。量子信息学也因其安全性和高效率得到各国的高度关注。2020年10月,习近平总书记在中共中央政治局第二十四次集体学习会议上指出,要充分认识推

动量子科技发展的重要性和紧迫性,加强量子科技发展战略谋划和系统布局。2021年7月,欧盟各成员国签署了2027年之前实现量子通信基础设施全面运行的宣言^[8]。2022年1月,美国总统拜登首次将抗量子密码纳入国家安全备忘录^[9],同年5月又再次指示美国必须维持在量子信息学上的主导地位^[10]。

在量子信息学研究与示范方面,美国谷歌公司于2019年制造出了一台包含53个量子比特的“悬铃木”(Sycamore)量子计算机,2022年在其上采用经典混合算法实现了16个量子比特的计算^[11]。各大科研机构和IBM、微软、阿里巴巴、英特尔等公司也在量子计算及量子通信领域有巨大的资金和人力投入^[12]。全球范围内已建成多种类型的量子通信试点^[13-14],逐步在交通系统^[15]、卫星通信^[16]、线上交易^[17]、数字货币^[18]等领域进行应用并取得了良好成效。2016年8月,中国科学院潘建伟院士作为首席科学家成功发射了“墨子号”量子卫星^[19];郭光灿院士带领团队不断攻克半导体量子芯片的制造难题^[20],我国在量子信息的多个研究方向已处于世界领先水平。

作为实现“双碳”目标的主力军,新型电力系统亟需把握趋势开展量子信息学的研究和应用。电力系统的可靠稳定关乎国家安全和经济民生,其安全运行离不开安全可靠的通信。一方面,电力系统智能化进程的不断推进使得电力网络与通信网络交互更加密切,通信网络已然成为支撑新型电力系统不可或缺的一环。2015年末,乌克兰国家电网遭遇网络攻击,引发了数小时之久的停电事件,约140万人受到影响。这是世界范围内首次导致停电的网络攻击,网络安全和信息安全对保障整个电力系统可靠运行的重要性愈发凸显。另一方面,量子时代的来临也对电力系统通信安全造成了直接威胁。现代电力系统所用加密体系安全性的实现依赖于计算复杂度,而随着绍尔算法等基于量子计算解密方法的出现,传统加密算法已不再适用,电力通信网络缺乏应对量子攻击的防御办法。同时,随着高比例新能源引入的高不确定性和高比例电力电子设备带来的短响应时间,电力系统运行和控制中数据处理和决策生成对算力的需求激增,而量子计算具有很高的并行处理能力且可大幅降低某些问题的计算复杂度,在电力系统高时效和大算量的场景中具有广泛的应用前景。因此,开展量子信息学在电

力系统中的应用探索,对新型电力系统的发展十分重要。

当前,国内外诸多学者已经进行了量子信息学在电力系统中应用的理论探索^[21]。纽约石溪大学的P. Zhang教授团队将量子信息引入电力系统微网,围绕构建实际微网的量子通信体系进行了系列研究^[22-24];国网浙江省电力有限公司研发了量子安全增强的电力5G配网终端技术^[25]。目前P. Zhang教授团队已经在电力领域中的潮流计算^[26]、机组组合^[27]、暂态分析^[28]、稳定评估^[29]等问题中展开广泛研究。美国丹佛大学R. Eskandarpour等人总结了量子计算在智能电网优化规划、预测、网络安全等问题中的研究现状及应用前景^[30],并对比分析了现有量子硬件、软件工具和量子算法^[31]。

量子信息学逐步在电力系统中进行实践与示范。2012年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室开发出的电力网络量子保密通信系统,在“可信赖的电网网络基础设置”^[32](trustworthy cyber infrastructure for the power grid, TCIPG)项目的积极推动下已在伊利诺斯大学香槟分校的系统上完成了运行测试。2022年,美国橡树岭国家实验室联合美国Qubitekk公司在实际的智能电网数控系统上开展了基于QKD的安全认证试验^[33]。2022年,丹麦技术大学和IBM公司首次在真实量子计算机上完成了电网潮流计算。瑞士IDQuantique^[34]和澳大利亚QuintessenceLabs^[35]公司也正在积极开展量子信息在电网中的应用研究。2021年11月,我国首条基于量子加密无线通信的全自动化架空线路在浙江宁波投运^[36]。2022年1月,国网绍兴供电公司与中国盾量子合作,用“量子+”遥控发电机替代传统末端联络方案实现了配电网的独立微网运行功能^[37]。

综上所述,量子信息学在电力系统中的应用具有实际需求,也具备一定的理论探索与实践经验,但是总体仍处于起步阶段。在此背景下,把握量子信息学的发展机遇,探索量子信息学在电力系统中的应用,对于构建新型电力系统具有重要意义。本文从量子通信和量子计算两个领域总结了量子信息学在电力系统中应用的现状,并对未来前景进行了展望。

1 量子信息学原理简介

1.1 量子比特

量子比特(qubit)^[38]是量子信息的基本储存单

元,是量子信息学中的编码载体。量子比特是经典信息的比特(bit)在量子力学中的推广。量子比特保留了传统比特的离散特性,但其本质上是一个服从量子力学原理的量子二能级系统。量子力学中用态矢量 $|\varphi\rangle$ 描述量子的状态。一个量子比特在被测量之前,状态可以连续地分布于 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 之间,是两种状态的相干叠加。测量后比特以确定的概率塌缩到 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$ 态上。经过测量后,量子比特的相干部分就会丢失,从而变成一个经典比特。

1.2 量子态叠加和量子态纠缠

量子态叠加和纠缠都是量子信息学中独有的概念,既是实现量子通信的理论基础,也是量子并行计算的基本原理。

量子态的叠加性^[39]源于微观粒子“波粒二象性”和波动的“相干叠加性”,是多个信息状态累加在同一个微观粒子上的现象。量子信息也可以叠加地加载到同一个比特上。对于多比特系统也可以同时输入和操作 N 个量子比特的叠加态,这一叠加特点使得并行量子计算和信息加密成为可能。

量子态纠缠^[40]指2个或多个量子系统之间的非定域、非经典关联,是量子系统内各子系统之间具有非经典关联的属性,是多个粒子的微观状态纠缠在一起的现象。在量子系统对某个子系统的局域操作会影响到其余粒子的状态。

1.3 量子通信的安全性原理

量子通信将量子力学基本原理和密码学加密手段结合起来,能够在物理层面上保证信息传递的无条件安全。

德国物理学家海森堡在1927年提出了测不准原理(Heisenberg uncertainty principle)^[41]。对于任意未知的量子态 $|\varphi\rangle$,无法同时测得2个不对易可观测量的精确结果。这意味着窃听者无法通过测量的手段获得量子态 $|\varphi\rangle$ 的完整信息,这一原理为量子通信安全提供了重要物理基础。此外量子态测量的过程还会破坏单粒子的叠加性和多粒子的纠缠性,导致量子态塌缩、相干消失,利用这一特点可以检测是否存在窃听者^[42]。W.K. Wootters 和 W. H. Zurek 于1982年提出并完善了量子不可克隆原理(non-cloning theorem)^[43],指出未知的量子态不能被精确复制。在量子通信过程中,信道中传递的信息对于窃听者来说是未知的,所以窃听者也无法通过克隆的方式获得量子态信息。

因此,量子通信的安全性依赖于量子力学基本

原理,与外界条件无关。量子态测量塌缩理论使得第三方窃听者无法在不被发现的前提下进行窃听,海森堡测不准原理和量子不可克隆原理分别保证了窃听者不能通过任何测量或克隆的方式获得所传输的量子态。这种理论安全性已经在通信系统中得到了严格证明^[41-44]。

1.4 量子计算的基本模型

量子计算作为一种遵循量子力学规律的新型计算模式,其模型主要包括以下4种:量子线路模型、量子退火模型、单向量子计算模型、拓扑量子计算模型,其区别表现为物理实现方式不同^[45]。

量子线路模型也称量子逻辑电路模型,与经典线路模型相似,本质上是依次执行的量子逻辑门序列,主要包括3个部分:量子态初始化、逻辑门操作控制、测量^[46]。借鉴经典计算的思想及概念,设计不同的量子线路可以实现不同的量子算法。因此,解决电力系统大多数问题的量子算法,均可以基于量子线路模型表征并实现。

量子退火模型属于量子绝热计算^[47]的范畴,量子退火模型可用于表征优化问题的最优解分布区域和最优演化方向,使部分组合优化问题映射为物理系统哈密顿量的求解问题并基于量子绝热原理求解。目前加拿大的D-wave公司已制备出先进的量子退火机,但实用性和扩展性需进一步探索。电力系统中的机组组合、扩展规划常包含组合优化问题的求解,因此量子退火模型在电力系统中也具有一定的应用前景。

单向量子计算模型^[48]的基本思想是制备一系列具有高纠缠特性的量子态,通过单比特的测量实现较高适用性的量子计算,主要面向基于测量的量子计算。而拓扑量子计算模型^[49]利用系统中低能激发准粒子编码量子比特信息,在满足辫群规则下借助任意子的交换完成逻辑门操作,通过干涉测量读出结果。

总体而言,量子线路模型和量子退火模型应用探索相对较多,单向量子计算模型和拓扑量子计算模型是针对特殊应用的计算模型,普适性较低。量子算法具备的并行优越性使其在处理问题时速度能够优于经典计算机,因此在电力系统中具有广阔的应用潜力。

2 量子通信在电力系统中应用的现状

随着新型电力系统的发展,电力系统调度特性

更加复杂,调度边界不断变化,调度对象更加多元,这对通信网的架构设计和性能指标都提出了更高的要求^[50]。同时,海量智能化分布式终端加深了电力系统信息物理耦合的程度,增大了电力系统受到信息攻击的可能性^[51]。面对即将来临的量子时代,完整、安全、可靠、弹性的信息防御体系是新型电力系统必不可少的重要部分^[52]。

量子通信利用量子的基础物理特性实现信息的安全传递,包含加密、解密、授权、密钥等多个环节。因其主要应用于保密通信场景中,故又称量子保密通信。与传统通信不同,量子保密通信过程涉及到两条信道,其具体流程如图 1 所示。量子信道负责将量子密钥传输并分发至通信双方。利用所获的量子密钥,发信方对明文进行加密并利用经典信道将密文传递至受信方,受信方再将收到的密文解密。在此过程中,一旦存在信息窃听或篡改将导致量子态测量的偏差,进而被通信双方发现,从而保证了通信过程的绝对安全。

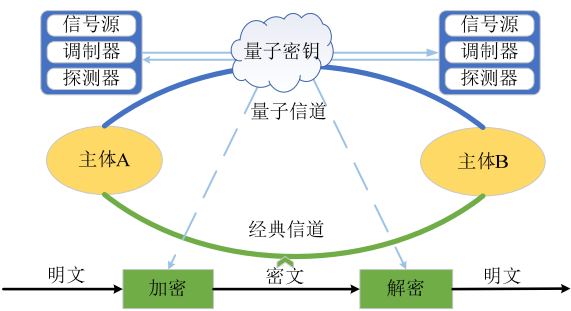


图 1 量子保密通信流程

Fig. 1 Quantum communication process

虽然学术界已经对量子密码学开展了一定研究,但是量子密码在实际通信中的应用还需要针对不同的应用对象,挖掘技术特征,总结实际问题,设计出兼具安全和经济的适应性方案。表 1 按照通信流程总结了几类较为成熟的量子加密技术,并对它们在电力系统中的适用性进行了分析。通过分析,

认为量子保密通信能够满足电力系统的通信需求,适用于建设新型电力系统中量子安全的通信网。

在正式进行通信之前,通信双方首先需要确认彼此的身份。现有的量子身份认证(quantum identity authorization, QIA)大多基于量子密钥分发协议设计,常用的量子密钥分发协议能够对被动攻击保证无条件安全,但对于伪装攻击和中间人攻击等主动攻击还存在一定漏洞^[53]。

通信过程中涉及量子密钥的环节包含量子随机数生成(quantum random number generation)和量子密钥分发(quantum key distribution, QKD)这两个部分。量子随机数生成器基于量子过程的概率特性,能够产生不带偏好、不可预测、绝对随机的数组^[54]。量子密钥分发是目前发展最成熟的量子加密方法,为主体间的保密通信提供用于信息加密的密钥。BB84 协议和 E91 协议是最具代表性的两种量子密钥分发协议。BB84 协议^[55]由 C. H. Bennett 和 G. Brassard 于 1984 提出,是世界上第一个量子通信协议,也是目前最广为人知的量子通信协议。1991 年, A. K. Ekert 提出了基于纠缠态的 E91 协议^[56]。和 BB84 相比, E91 协议采用了不同的编码方式将经典比特转化为量子态,在窃听者检测环节依据的策略也存在差别。

目前量子信息加密方法从多种角度分别解决了通信过程中面临的不同问题。针对位置的攻击类型大多依赖于信息复制,而量子的天然特性可以完全避免这个问题,因此基于位置的量子加密(position-based cryptography)应运而生^[57]。设备独立的量子加密(device-independent quantum cryptography)致力于移除安全证明中基于设备部分的假设,其可用性已经得到广泛证明^[58]。后量子密码技术(post-quantum cryptography, PQC)的目标是开发对量子 and 经典计算机都安全的密码系统^[59],本

表 1 量子通信技术及其在电力系统中的适用性分析

Table 1 Quantum communication technology and its applicability in power systems

通信环节	技术名称	技术依据	在电力系统中的应用
身份确认	量子身份认证 ^[53]	验证用户身份的真实性 ^[62]	无, 适用于电力市场、隐私保护
量子密钥	量子随机数生成 ^[54]	生成完全随机的序列作为密钥	无, 适用于产生量子密钥
	量子密钥分发 ^[55-56]	为主体间的保密通信分发用于信息加密的密钥	有, 进一步解决大规模应用问题
加密方法	基于位置的量子加密 ^[57]	根据主体的地理位置来简化确认权限过程	无, 适用于确认控制中心的身份
	设备独立的量子加密 ^[58]	摆脱了量子安全证明中基于设备的假设	无, 适用于实际工程中设备不完全可靠的情景
	后量子加密 ^[59]	量子时代未来通信加密体系的必然趋势	无, 适用于构建量子安全的通信体系
	量子秘密共享 ^[60]	需要参与秘密共享的主体共同合作才能恢复加密信息	无, 适用于实现同级多主体的量子安全
通信方式	量子安全直接通信 ^[61]	通信双方可以直接在量子信道内交换密文	无, 适用于关键厂站之间的量子信息传输

质上还是一种基于数学难度的加密方案。量子秘密共享(quantum secret sharing, QSS)不仅是传统秘密共享在量子场景中的应用,而且能够实现经典信息与量子信息的秘密共享^[60]。

在通信方式上,量子安全直接通信(quantum secure direct communication, QSDC)利用纠缠粒子的关联性和非定域性等量子特性使得通信双方可以直接在量子信道内交换密文。目前,我国已经实现了 100km 的量子直接通信^[61],使得在卫星-地球通信、城市点对点通信等无法进行中继的应用场景下实现量子安全的保密通信成为可能。

相比在其他领域的应用,量子通信在电力系统中的应用才刚刚起步。本文将电力系统中量子通信发展所面临的挑战归纳为 4 大类。

1) 远距离信息传输。我国幅员辽阔,地理跨度大,电网规模稳居世界第一位,实现远距离量子传输是首要问题。

2) 多主体通信。新型电力系统中分布着数量庞大的智能终端,而现有的量子密钥技术成码率较低,如何满足多主体之间的通信需求成为难题。

3) 统一标准化。电力通信网络结构特殊,不能直接照搬通用的量子通信协议,目前量子信息领域尚无针对电力系统通信网络设计的协议和架构,缺少统一标准。

4) 专用研发平台。量子设备高昂的价格和电力系统复杂的特性导致现场试验难以进行,因此模拟电力系统中量子通信过程的仿真软件和测试平台是大规模应用的前提。

针对这 4 大类问题,本文梳理了现有研究成果的解决思路、应对场景和突出贡献,并按照其主要解决的难题进行了总结。

2.1 远距离信息传输

实现量子通信的关键在于把承载信息的量子比特分发到足够远的目标地点^[20],提高传输距离并合理规划信息路径是应对大规模电网通信需求的基础。现有的通信方案可以分为地面通信和卫星通信 2 种。目前,地面通信发展相对成熟,已经能在百公里范围内实现商业化应用^[20],但该距离仍无法满足我国电力通信中信息的无中继传输需求。另一种方案基于空间量子卫星,距离可达到千公里级别^[16],但存在受大气影响大、定位困难、视野半径小等工程难题^[63-65],离满足电力系统实际通信需求尚远。我国电力系统网络规模大、地域跨度广、运

行环境复杂,信息传输过程中存在自然损耗和环境影响等多种扰动因素,如何设计适用于电力系统的远距离量子通信方案是亟需解决的难题。

2.1.1 量子中继系统

设置中转站点是提升信息传输距离最直接的方法。由于量子比特不可克隆的特性,处理的放大器设备无法直接处理量子信息,需要依靠量子中继站^[66-67]和可信任节点实现量子信号中转。量子中继站通过相邻站点不断进行的量子纠缠交换过程在两个远距离通信主体之间建立起量子纠缠,即使窃听者攻破了某个中继站点也不能获得最终的密钥;可信任节点相当于用户终端,每个节点之间共享传统密钥,一旦某个节点被窃听将导致所有加密信息泄露。

文献[68]设置中继站将能量较弱的信号加强后再重新发送至下一站点,进而解决传输过程中信号衰减的问题。文献[52]另择途径,引入卫星进一步扩大了量子网络的覆盖范围,根据电力设备的特性选用不同信号传输方式,通过扩大量子信号传输的覆盖范围解决长距离传输问题。

2.1.2 路由选择方法

在信息远距离传输的过程中,如何基于中继节点找到最优的路由选择方法是需要考虑的一大难题。文献[69]利用中继器在不同的应用场景下选择路由,每个节点生成路由表并和相邻节点不断分享更新直至所有节点找到总花费最小的路由方案。

针对不同路由协议和中继方案对量子网络通信表现的影响,文献[70]面向包含中继器和可信任节点的混合系统提出并验证了集中和分布式 2 种路由算法。与大部分仅针对中继器的路由算法相比,这种算法避免了单纯地把中继器作为扩展传输距离的工具,而是当成量子网络组成部分。

2.1.3 通信性能评估

电力系统中外部环境扰动多、种类杂、损耗大,传输过程中信号会产生变形和失真,需要对其进行可靠性评估以保证通信质量。

文献[71]提出了一种量子电力通信网的可靠性评估模型,在经典通信模型评估的基础上分别针对密钥层和业务层构建评估体系。

由于卫星通信限制较多且难以进行实验,目前针对电力系统的远距离量子通信多采用地面通信方案。量子中继站可靠性高但现有技术难以满足其对量子记忆功能的需求,可信任节点工作原理相对

简单但在应用中的安全性难以保证。两种中转设备各有优劣,在高质量中继器大量投入使用前,依托电网结构设置可信任节点和中继器组合的中继系统,合理权衡安全性和经济性、实用性和技术性,是一种适合大规模使用的过渡方案。而随着“墨子”号实验平台的不断完善,未来对卫星通信方案的探索也可能会为量子通信网的建设提供新的方案。

2.2 多用户量子通信

现有量子通信协议多遵循端对端的原则^[55-56],而电力系统包含海量终端设备^[72],在每个设备间都建立起信道或量子联系是不现实也不经济的。因此,利用固定的量子资源满足多主体之间的通信要求就成了量子通信在大规模电力系统中应用的必经之路。首先统计通信终端的密钥需求和量子信源的生成能力,实现供需匹配。然后按照量子密钥应用的流程,在生成环节最大限度产出可用密钥;在存储环节避免长时间储存增多暴露带来的安全性降低和信号不同步的问题;在分发环节合理安排有限资源,用一定数量的密钥满足尽可能多终端的需求。

2.2.1 量子信道的选择

最初面向多主体量子通信的研究方案多基于交换机和光纤展开。由于光纤在电力系统中覆盖率高,可以直接作为量子信道,因此1990年开始多主体的光纤量子密钥分发就已经被广泛研究并应用于实际系统,当前已经形成了DARPA量子网络^[73]、SECOQCQKD网络^[14]、芝加哥QKD网络^[74]等较为成熟的试验系统。

然而这种单独设置量子通道的方式受限于备用光纤资源储备,不利于后期进一步发展,需要找到光纤利用率更高的方法。文献[75]通过时域滤波和波分复用实现了量子信息和数据信息在光纤中的共存,并在实验室中完成了90km的传输验证。文献[76]以变电站的无源光学耦合器作为中转实现了传统信息和量子信息的信道共用。但是这2种方案在复杂系统中的表现还需要进一步讨论。

2.2.2 可用量子密钥数提升

目前量子密钥成码率低的技术问题在量子信息学中仍未得到解决,所生成的量子密钥数无法满足电力系统通信需求。在此背景下,电力系统衍生出了相应的实用办法。

文献[77]对有限的量子密钥进行剪切和重新组合,在密钥总数不变的情况下形成大量的带有不同量子性质的密钥分发给终端。这种方案将传统密码

学中的种子密钥替换为量子密钥,其本质未涉及量子原理,操作简单所以具备实用价值。文献[23]也采用了相似的方法,将密钥剪成2段、3段再组合。对于密钥的处理方式不同所得到的量子密钥特性也不同,其中重新组合的随机生成技术是关键。

2.2.3 量子密钥资源调配

在密钥分发方面,需要调度有限的量子资源以满足尽量多终端的加密需求。文献[77]利用固定密钥池对密钥进行提前储存,构建了一种两阶段密钥池共享策略以实现密钥动态匹配。而文献[78]设计了一种移动设备对量子密钥进行转运,通信终端无需布置量子相关设备就能达到灵活运送量子密钥的目的。如何保证运送设备的安全性和足够大的储存空间是需要进一步考虑的问题。这两种方法从不同的角度出发,都能实现对量子密钥资源的管理与调度。

电网中的智能量测系统可以精准地获取系统状态并为后续资源调配提供基础。文献[79]将其与量子信息结合,提高了电力系统数据的安全性。但是该方案存在设备共享密钥的情景,这无疑降低了系统的安全等级。

连续变量协议相较于离散变量协议有更高的成码率;离散变量协议传输距离较长但由于需要在每个智能终端都配备单光子探测器所以性价比很低^[80-81]。为了结合这2种量子密钥分发协议的优势,文献[82]在终端设备和控制中心之间引入了代理人机制,形成了双层通信架构。终端设备和代理人之间用低成本连续变量协议,代理人 and 控制中心之间用长距离的离散变量协议,这样只需要在中转的代理人处设置光子探测器就可以实现多终端、远距离的量子信息传输,不仅提升了系统的性能还大大降低了成本。灵活的设置方式也为量子通信设备和现有基础设施的结合提供了参考。

截至2022年6月末,我国的光纤总长已达5791km^[83],实现了220kV变电站全覆盖,配电系统中35kV及以下的低电压变电站也在进一步加速建设,具备良好的基础设施条件。光纤无疑是目前电力系统中最为合适的量子信道,但为了满足未来量子通信网扩展的需求,仍需设法提高光纤利用率,同时结合无线局域网等基于自由空间介质的手段,进一步拓宽信道资源。

根据不同的用户需求分发相应密钥也是优化多用户通信系统布局的一种思路。对于公开结算系

统,低速率的密钥分发就可以满足每日一次的数据加密需求;而对于关键控制系统,则需要实时同步系统状态,采用高速率的密钥供给才能保证调度指令和状态交互的正常进行。

2.3 统一化标准

提前做好系统架构的规划是未来发展量子安全电力通信网的基础。量子通信网应当平衡整体性、可靠性、安全性和经济性^[21],在现有电力通信网的基础上进行建设,实现对传统信息和量子信息的兼容。为了抵抗量子计算机的攻击,美国国家标准与技术研究院(national institute of standards and technology, NIST)于 2015 年率先开启了后量子密码学计划,发布征集令希望制定新的标准化加密算法^[84]。而针对繁杂多样的应用场景,应当制定可适应的通信协议以满足各类终端的不同通信需求可以增加系统的灵活性。

2.3.1 量子通信协议

在目前最常用的量子通信协议中,窃听者无法测量或克隆量子信息,但是可以通过伪造假身份的方式恶意获取信息。直观来讲,窃听者可以先伪装成发信方建立和收信方的密钥,再伪装成收信方建立和发信方的密钥,这样就能在不被检测出来的情况下在通信双方之间建立一个非法中转站。为了避免这种问题,在进行信息传递之前必须提前确认对方的合法身份。

文献[85]针对二次系统提出了一种改进的 BB84 协议,在进行量子密钥分发前引入身份认证环节以保证通信过程中授权信息的私密性。这种方法是对密钥分发协议的补充,实现起来较为简便,在光纤广布的电力系统中有良好的应用前景。

同样是基于量子密钥分发协议,文献[86]提出了一种网络-中心的结构,由中心节点扮演可信任机构的角色,从而在轴辐式结构中实现层级信任架构。这种量子授权密钥生成方法避免了对长期共享密钥的提前部署,可信任机构在公布用户密钥对和确认密钥的预览表后就可以进入离线状态,用户能够自行完成授权密钥的生成,在很大程度上降低了可信任机构的工作难度。

文献[24]通过在终端设备中添加量子模块,实现了基于共享密钥的量子通信协议。从电力系统信息架构出发,形成了较为完善的通信协议。

2.3.2 量子通信架构

在架构设计方面,现有研究从不同角度出发提

出了多套面向电力系统的量子通信方案。

文献[87]基于量子纠缠原理设计了适用于直接通信的电力通信网络框架。整个架构由下到上分为物理层、信息层和应用层,其中通信层由经典通信层和量子通信层并列组成,分别负责传输传统信号和量子信号。通过实验室测试表明,所提出的量子直接通信架构在微网中比传统的量子密钥分发表现更好,有更高的稳定性和通信质量。

文献[69]基于等距模型设计了一种量子电网架构,并利用能跟电力系统实时仿真器进行交互的量子电网模拟器实现了对微网量子通信系统的仿真。

电力系统量子通信协议和通信架构的设计要更多面向实际,从原有的电力通信网出发,注重结合电力系统的拓扑结构和控制流程,实现各层级通信网统一规划和顶层设计。同时,要考虑新型电力系统中分布式新能源、电力电子设备和智能终端不同的控制特性,为实现信息采集和协同调度打好基础,利用量子系统的高效率进一步推进电网智能化。而其安全性可以满足电力市场的私密性要求,为电力市场结算提供新的信息途径。

2.4 专用研发平台

量子通信设备价格高昂,无法直接在电网中设置大范围试点。在这种情况下,能够实现信息物理融合的专用研发平台是将量子通信网络推广至电力系统必备的前提条件。电力系统动态特性复杂,需要实现潮流计算、安全约束、控制特性的模拟^[88],而量子通信涉及的各终端通信协议不同,如何在研发平台中结合量子信息流和电力流,模拟实际电网运行中量子通信的信息传输、路由构建、指令执行等一系列操作是必须考虑的问题。

2.4.1 仿真软件

由于量子设备和电力系统的复杂特性,现场实验难以进行。推动量子技术从理论到走向实践还需要仿真软件的支持。美国电话电报公司和加州理工学院合作的智能量子网络和技术计划开发了仿真软件 SQUANCH^[89],可以实现多主体、多协议量子网络的模拟,同时包含经典错误模型,能够模拟误码和纠错过程。另外, SQUANCH 还可以用作量子计算模拟库,完成分布式量子信息处理和并行计算。

文献[90]将信息模块结合到电力网络中,开发了一个能够实现包含量子通信功能的智能电网模拟平台。其优势在于可以同时模拟信息流和电力流,能够验证所提出量子通信协议的有效性,为量

子通信协议策略的制定提供了评价工具。但只局限于配网层面,难以实现对大规模网络的模拟。基于离散事件的 NetSquid^[91]进一步扩展了可模拟系统的规模,为未来量子网络的建设提供了设计工具。

与大部分现有工具相比,QuNetSim^[92]在实时仿真方面实现了突破,因此适用于控制实验室硬件设备。用户可以直接调用工具包模拟经典量子通信协议并进一步自由调整。它的优点在于交互界面友好、调用代码简单,但仍存在2点不足:一是无法支持大规模系统模拟,二是忽略了量子网络中的物理部分。

2.4.2 半实物平台

半实物平台能更逼真地还原量子电力通信网的运行情况,为通信方案的实际应用提供参考。P. Zhang 团队基于上文提到的 SQUANCH 框架搭建了一套仿真系统^[87]。控制中心作为连接电力网络和量子网络的纽带,对电网模拟器和量子网络模拟器的信息进行收发处理。团队还多次在研究中使用实时数字仿真系统(real time digital simulation system, RTDS),逐渐搭建并完善了软硬件结合的半实物测试平台。能够模拟量子密钥分发协议,并实现实时交互、误差校正和私密性检测等功能。但这些平台都只针对微网,可用于大规模电力系统模拟的半实物平台尚未出现。

目前电力系统中的量子通信缺乏验证手段,需要专用研发平台的支持,应当尽早开始搭建。在信息层模拟量子通信协议、信息攻击和误差修正,在物理层描述实际电力潮流、系统拓扑和设备特点,实现信息物理融合的测试。通过模拟实验得到通信协议在电力系统中的表现,评估量子通信网的性能并进一步完善。在实际搭建过程中,宜采用模块化的思想,分别实现量子网络和电力网络的建模后再综合调试。

3 量子计算在电力系统中的应用的现状

目前,高比例新能源与高比例电力电子设备接入电力系统,电力系统规划和运行面临的问题变得更为复杂,计算效率要求更高。同时,“云、大、智、物、移”等技术在电力系统的推广应用积累了海量数据,如何在海量数据中挖掘关键信息以促进电力系统高效运行,也需要高并行、大算量的支撑。随着近年来量子计算的快速发展,探索量子计算在电力系统中的应用具备必要性和可行性。

量子计算是一种遵循量子力学规律调控量子信息单元进行计算的新型计算模式^[93],其核心优势在于信息表征和高速并行计算能力,在特定经典计算求解困难问题上可以实现指数级加速^[94]。量子计算大致分为2个部分:一是量子计算机硬件、原理及物理实现方式;二是量子算法,此部分作为量子计算领域的核心和驱动力,与量子计算机的发展密不可分。

目前量子计算仍受制于嘈杂环境的干扰,量子硬件、计算系统远远达不到成熟的计算标准,无法实现足够低的错误率和足够多的量子比特。如图2所示^[95],美国谷歌公司将量子计算硬件发展分为3个阶段:1)经典模拟阶段:量子比特数量在2位数以内,经典计算能够完成与量子计算相同的计算任务并相互印证。2)近期应用阶段:在此阶段可达到几百或上千量子比特,错误率可降至 10^{-3} ,在某些领域能够凸显量子计算加速计算效率的优势。3)实用化容错量子计算阶段:可以构建 $10^6 \sim 10^8$ 量子比特的处理器,且错误率在 10^{-3} 以内,在实际应用层面完全胜任或取代经典计算。一台实用量子计算机需要硬件、软件、应用程序和纠错技术之间的相互作用与配合。

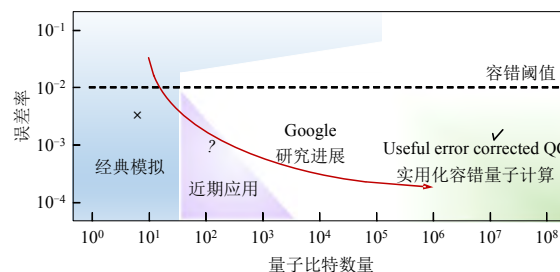


图2 谷歌近期发展目标

Fig. 2 Google's goals for near-term scaling

量子计算算法理论在电力系统中的研究探索可分成两大类:1)量子算法:在量子硬件环境下运行求解;2)量子衍生算法:在经典计算环境下利用量子原理或特性优势实现算法加速。目前量子算法和量子衍生算法在求解线性/微分方程组、预测、优化、机器学习等方面已有所突破,按照电力系统中的探索研究可主要归类为潮流计算、机组组合、故障检测与诊断、稳定性评估、运行控制、优化规划等领域,其梳理总结如图3所示。

不同研究场景可能会涉及同类量子算法或原理,因此本文将量子算法研究类别归纳为线性代数运算、优化问题求解、机器学习、参数估计4大类,在各类研究问题下简要概括算法原理,列举其电力

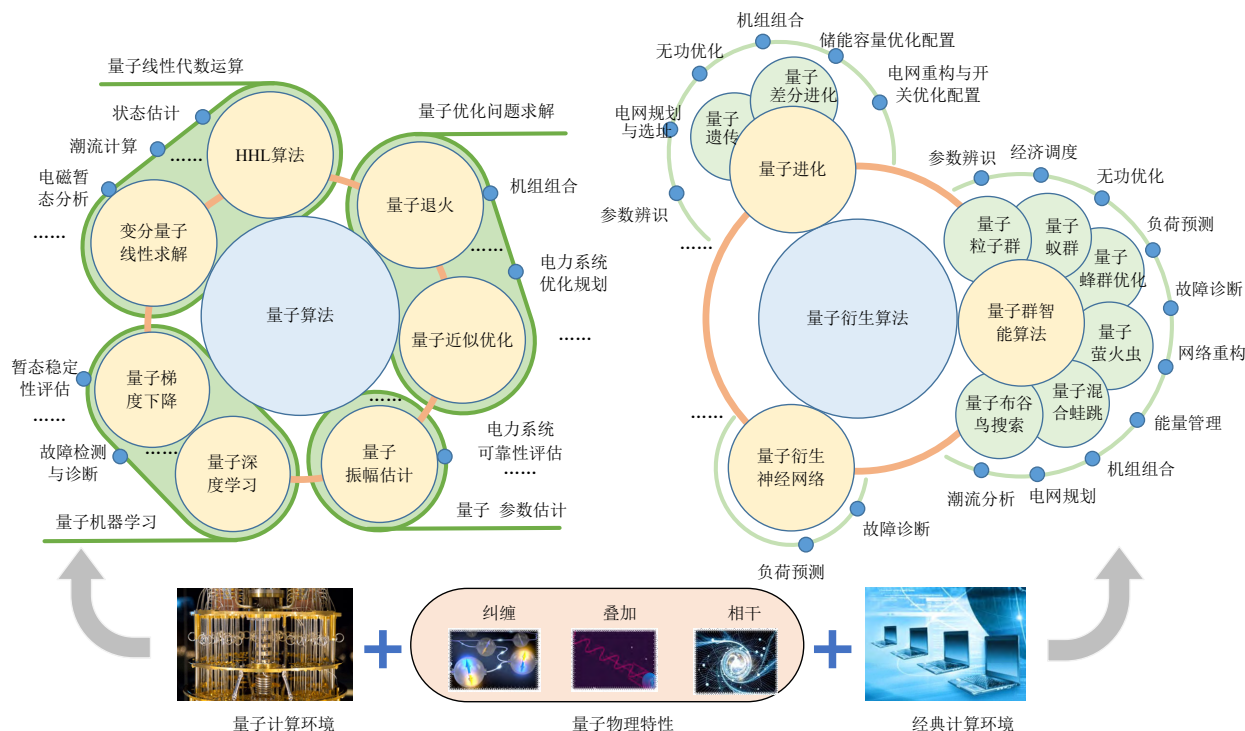


图 3 量子计算在电力系统中的探索研究

Fig. 3 Exploratory research on quantum computing in power systems

研究场景和算法优缺点,以更好地诠释量子计算的特征和进一步发掘应用场景。

3.1 量子线性代数运算

能够实现量子线性代数运算的算法主要包括 Harrow-Hassidim-Lloyd (HHL)算法、变分量子线性求解(variational quantum linear solver, VQLS)算法和变分量子本征求解器(variational quantum eigensolver, VQE)算法等。

HHL 算法最初由 A. W.Harrow, A. Hassidim, S. Lloyd 这 3 位学者提出并且广泛应用于线性方程

求解。对于线性方程 $Ax=b$, HHL 算法近似构造了量子叠加态 $|x\rangle$, 并且将 $|b\rangle=\sum_i b_i|i\rangle$ 作为量子计算机的输入, 依据 $x=A^{-1}b$ 输出量子态 $|x\rangle=\sum_i x_i|i\rangle$, 从而实现求解^[96]。当 A 矩阵为厄米矩阵时, 利用量子 HHL 算法可以获得时间复杂度为 $O[\log(N)s^2\kappa^2/\epsilon]$ 的指数级加速过程。HHL 算法框架示意如图 4 所示。

VQE 算法与 VQLS 算法均属于变分量子算法, 其利用量子计算资源和经典计算资源近似求解, 因此它们也属于混合量子-经典算法的范畴。VQE 算

求解。对于线性方程 $Ax=b$, HHL 算法近似构造了量子叠加态 $|x\rangle$, 并且将 $|b\rangle=\sum_i b_i|i\rangle$ 作为量子计算机的输入, 依据 $x=A^{-1}b$ 输出量子态 $|x\rangle=\sum_i x_i|i\rangle$, 从而实现求解^[96]。当 A 矩阵为厄米矩阵时, 利用量子 HHL 算法可以获得时间复杂度为 $O[\log(N)s^2\kappa^2/\epsilon]$ 的指数级加速过程。HHL 算法框架示意如图 4 所示。

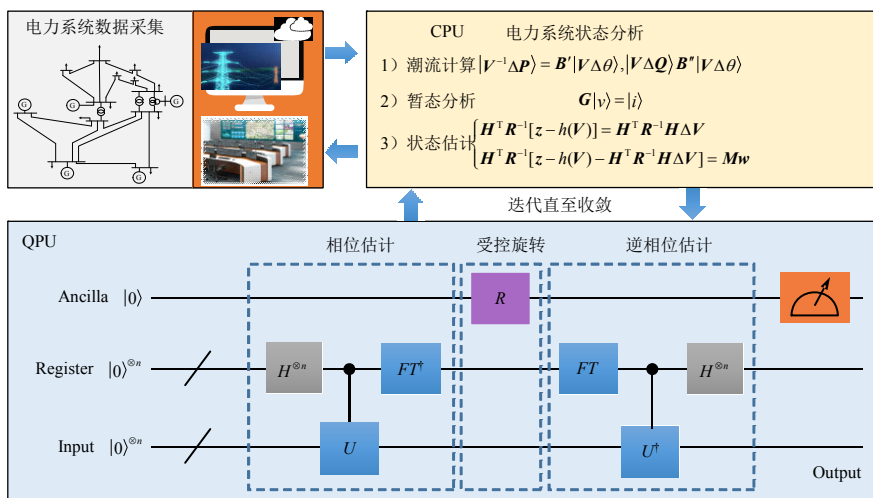


图 4 HHL 算法的框架

Fig. 4 HHL algorithm's framework

法通过优化含参量子线路,求解得到矩阵本征值和本征矢。在 VQLS 算法中,经典优化器、代价函数可自由选择,其算法框架如图 5 所示,通过经典处理器与量子处理器不断迭代,找到量子线路 $V(\alpha)$ 的最优参数 α_{opt} ,使代价函数 $C(\alpha)$ 实现最小值。在算法终止时,满足 $V(\alpha_{\text{opt}})|0\rangle=|x'\rangle$ 且 $\|x-x'\|_2\leq\varepsilon$,其中 $|x\rangle$ 为线性问题精确解, ε 为近似解的误差限。

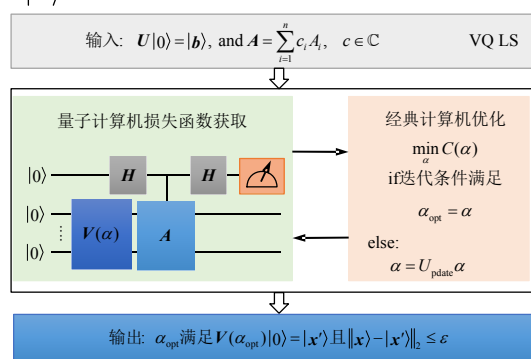


图 5 变分量子线性求解算法的框架

Fig. 5 Variational quantum linear solver algorithm's framework

量子线性代数运算已在潮流计算、电磁暂态分析、状态估计等电力领域实现了广泛探索。

1) 潮流计算。

潮流计算对于电力系统规划和运行问题具有重要作用。从数学角度,潮流计算旨在求解一组由潮流方程描述的非线性代数方程,关键在于采用迭代法快速求解线性方程组。

文献[26]首次提出量子潮流(quantum power flow, QPF)算法,设计了一种基于厄密共轭和恒雅克比矩阵的快速解耦 QPF 模型,利用改进的 HHL 算法求解,并在 5 节点测试系统上验证了 QPF 的有效性和计算效率。文献[97]提出了一种基于门电路的 HHL 量子算法来解决直流潮流计算问题,在标准的 IEEE 300 节点测试系统上验证,并实现指数级的加速效果。

VQLS 算法与上述的 HHL 算法不同之处在于, HHL 算法是在量子计算机理想无噪声的假设前提下应用,依据当前计算机的发展水平,以 VQE、VQLS 为代表的变分量子算法能够权衡协调量子计算和经典计算各自的优势,在减噪、保真状态下交互计算,同时也可以减少量子电路的深度。基于此优势,文献[98]在电力系统潮流计算中引入了基于变分原理的量子算法,通过构建局部优化目标函数 C_p ,搭建阿达玛(Hadamard)量子测试电路,设计变分电路并进行潮流矩阵部署,对比潮流计算求解精

度、效率,展现变分量子算法特点及优势。

2) 电磁暂态分析。

新型电力系统中电力电子设备的渗透率急剧升高、数量增多,规模进一步扩大,依靠电磁暂态程序(electro-magnetic transient program, EMTP)在经典计算机中解决问题较困难且成本昂贵。EMTP 在各时间步长下离散化电力网络的动态方程,形成等效电阻网络的数值线性方程,将量子线性求解算法引入电磁暂态分析中,有望提升复杂大规模 EMTP 问题求解效率。

文献[28]首次提出基于 HHL 的 QEMTP 算法来尝试解决电磁暂态问题。通过对 EMTP 公式量子编码形成 $G|v\rangle=|i\rangle$,将公式表征为本征态与本征值的形式,经过求解及误差修正,在各种暂态场景下验证了其准确性和有效性,但 QEMTP 的实际应用仍面临量子电路深度、量子计算机噪声、矩阵维度等挑战。

为了克服上述面临实际量子计算环境噪声的局限性,文献[99]提出了基于 VQLS 的 QEMTP 线性求解算法,量子计算机将系统电导矩阵 G 和 I 作为输入,执行参数化的变分量子线路 $U(p)$,以获得节点电压的量子态,即 $|v\rangle=U(p)|0\rangle$ 。此后经典计算机更新变分量子线路参数 p ,通过二者交互迭代来优化变分量子线路的参数。

3) 状态估计。

电力系统规模持续扩大,经典状态估计复杂性呈现多项式扩大趋势,为满足降低计算复杂性和实时评估的需要,文献[100]将 HHL 算法引入微电网状态评估中,但存在病态增益矩阵出现、量子线路深度增加及量子比特资源过度使用等问题,直接利用 HHL 算法求解失去量子加速的优势。为此,文献[100]进一步提出预条件量子线性求解器,通过预条件迭代优化代替直接采用 HHL 算法求解线性方程,在病态情况下仍能高效地获得系统实时状态。

3.2 量子优化问题求解

优化问题的本质是给定一组连续或离散的变量和参数,在满足一定约束条件下使目标函数值达到最优。量子优化算法中,涉及离散变量的组合优化问题求解通常采用启发式算法,如量子退火(quantum annealing, QA)算法等,连续变量优化问题求解可利用量子近似优化算法(quantum approximate optimization algorithm, QAOA)等。

QA 算法表现为量子力学的绝热演化过程,是

模拟退火算法的改进和延伸。QA 算法是一种启发式算法, 1994 年最早由英国布朗大学 A. B.Finnila 等人提出^[101], 量子退火算法具备更倾向低能态的本质, 量子隧穿效应使其易于在离散化的搜索空间中得到全局最优解, 较传统退火算法不易陷入局部最优。

QAOA 是一种混合量子-经典算法, 于 2014 年由美国麻省理工学院 E.Farhi 等人首次提出^[102], 并在 2016 年提出 QAOA 是实现量子霸权的方法之一, 引起了学术界的广泛尝试和理论分析^[103]。QAOA 的过程可以分为以下 5 步: 1) 构造哈密顿量 H_p 用以编码组合优化问题的目标函数, 构造横向场哈密顿量 H_M , 与 H_p 共同作用于量子态; 2) 构造初始量子态 $|x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{i=0}^{2^n-1} |i\rangle$; 3) 哈密顿量 H_M 和 H_p 的演化过程交替进行 n 轮, 使量子态参数化, 如式(1)所示; 4) 在量子计算机中计算上述形成的量子态对 H_p 的期望值, 如式(2)所示; 5) 在经典计算机上更新变分参数 γ 和 β 并作为量子线路下一轮迭代参数, 若两次迭代参数满足收敛条件算法终止, 算法框架如图 6 所示。

$$|\psi(\gamma, \beta)\rangle = e^{-i\beta_n H_M} e^{-i\gamma_n H_p} \times \dots \times e^{-i\beta_2 H_M} e^{-i\gamma_2 H_p} e^{-i\beta_1 H_M} e^{-i\gamma_1 H_p} |x\rangle \quad (1)$$

$$F_n(\gamma, \beta) = \langle \psi(\gamma, \beta) | H_p | \psi(\gamma, \beta) \rangle \quad (2)$$

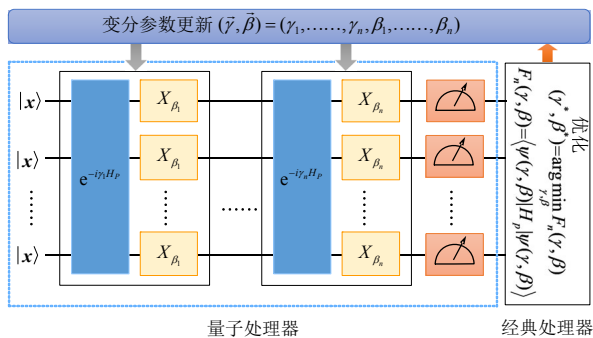


图 6 量子近似优化算法的框架

Fig. 6 Quantum approximate optimization algorithm's framework

QAOA 相干时长短, 对于演化过程轮数 n 较大的情况, 变分参数过多、量子电路过深, 为计算带来挑战。QAOA 在组合优化问题、机器学习、线性求解问题上已实现较多的理论与探索。

以下将介绍量子优化算法在机组组合、电力系统优化规划等电力领域中研究进展。

1) 机组组合问题。

单时段机组组合问题通常可建模为混合整数

二次规划问题, 只有无约束二次规划问题才能直接映射到 D-wave 系统上进行求解。文献[94]将连续变量的可行域离散化形成二次无约束二值优化 (quadratic unconstrained binary optimization, QUBO) 问题, 并在 D-wave 系统利用 QA 算法求解机组组合全局最优解。问题可行域离散化网格数量过多, 会出现精度低、求解质量差的问题, 需权衡精度和全局最优解以最大化发挥量子退火求解的优势^[94]。

与 QA 算法不同的是, 文献[104]应用混合量子-经典方法来解决机组组合问题, 使用 QAOA 算法将 QUBO 问题转化为涉及变分参数 γ, β 的连续优化问题, 使用 Qiskit 仿真工具验证方法的有效性。进一步地, 文献[105]探索性地将量子交替方向乘子法 (quantum alternating direction method of multipliers, QADMM) 运用在求解量子分布式机组组合问题中, 并提出机组组合子问题分解和分布式协调的框架, 为利用有限的量子资源解决大规模机组组合等离散优化问题提供新思路。

文献[27]在 QAOA 引入代理拉格朗日松弛 (surrogate Lagrangian relaxation, SLR) 方法处理机组组合问题, 含二进制变量和连续变量的子问题分别由量子计算机或经典计算机求解, 提出分布式框架协调各区域间的量子/经典计算资源, 同时保护数据隐私, 显示了量子代理拉格朗日松弛巨大潜力和可扩展性。与上述问题处理方法不同的是, 文献[106]提出了一种解决机组组合问题的重构策略, 将问题分解为 1 个 QUBO 子问题和 2 个非 QUBO 子问题 (有/无约束的二次子问题), 加入 3 分块的 ADMM 算法, 并在 IBM Q 系统上验证。

2) 电力系统优化规划。

相量测量单元 (phasor measurement unit, PMU) 能够监测电能质量并保障电网安全运行, 考虑经济成本如何优化配置 PMU 具备现实意义。文献[107]证实了绝热量子退火算法在解决相量测量单元优化配置问题中的可行性, 与 CPLEX 优化器和模拟退火法在求解精度和效率上对比验证。

在能源设施配置优化问题中, 文献[108]基于 Max-cut 原理引入 QAOA, 有效应对不同规模的系统发电容量优化配置及选址面临的挑战, 并使用 IBM 量子计算机求解, 实现提高能源利用率和降低碳排放率的目的。

3.3 量子机器学习

传统机器学习算法可借助量子计算的高并行

性优势实现自身优化与效率提升,近几年来量子机器学习(quantum machine learning, QML)改进思路涉及2个方面:一方面是引进量子计算探索如何改进提高机器学习计算效率;另一方面是如何利用量子计算的特性创新性地提出智能化的量子机器学习算法。QML将量子信息技术与机器学习算法结合,已经在无监督量子聚类、有监督量子分类、量子降维、量子深度学习等算法中实现了探索和应用^[109]。但QML在带来希望憧憬之时,也面临由于非线性的激活函数、退相干效应、巨大希尔伯特空间导致的量子测量困难等挑战。量子机器学习在电力系统中的探索研究主要涉及稳定性评估、故障检测与诊断等分类和预测问题,在高维数据处理和模型训练方面表现出较大发展空间和潜力。

1) 暂态稳定性评估。

由于大规模电力系统高度非线性、时间空间多尺度、不确定性等性质,其暂态稳定性评估成为有效保障电网安全的重要难题之一。借助于数据驱动算法的有效优势,文献[29]设计了一种表达性高、深度低的量子电路用于量子暂态稳定评估(quantum transient stability assessment, QTSA)。其关键在于将欧氏空间中的暂态稳定性特征嵌入到希尔伯特空间中的量子态,利用QML算法训练模型输入和输出之间的量化映射,通过量子梯度下降算法使量子电路在输出空间沿着最陡的方向得到有效训练,最后显式表示出暂态稳定/不稳定区域,并验证了QTSA在有噪声环境下的适用性和准确性。

2) 故障检测与诊断。

测量信号特征提取的质量将直接影响故障检测与识别的有效性和准确性。受限玻尔兹曼机(restricted Boltzmann machine, RBM)和条件受限玻尔兹曼机(conditional restricted Boltzmann machine, CRBM)均是先进的特征提取模型,但在故障诊断中将此类特征提取模型与神经网络相结合计算复杂度高、训练时间长。为应对此挑战,文献[110]提出一种基于量子计算的混合深度学习故障诊断框架,在绝热量子计算环境下借助量子采样技术训练CRBM网络,获得模型最优参数,而后将CRBM优越的特征提取能力与判别训练相结合,实现高保真地测量识别数据样本和分类电力系统元件故障。

3.4 量子参数估计

量子振幅估计算法(quantum amplitude estimation, QAE)是一种参数估计算法,最早在2002

年由G. Brassard等人首次提出^[111],较经典算法可实现二次方加速收敛。其本质是将参数估计问题转化为一种算符操作,通过测量量子态振幅给出待估计的参数,其中可利用量子相位估计(quantum phase estimation, QPE)算法^[112]对量子线路部分参数进行估计。

QAE算法可以与经典机器学习、优化算法组合应用,但量子比特的数量及强连接性影响QAE算法准确性。目前已经证明在估计不确定参数时,QAE具有 $O(1/\sqrt{S})$ 的收敛速度,优于经典蒙特卡洛模拟(Monte Carlo simulation, MCS)的 $O(1/S)$ 收敛速度。文献[113]针对经典MCS方法的不足,首次尝试将量子计算引入电力系统可靠性评估中并证实其应用潜力。文中建立量子形式的配电系统可靠性模型,并利用QAE算法生成随机变量概率分布、估计随机变量函数值和设计测量量子线路,指出未来量子计算有望在构建计及可靠性约束的优化模型方面实现探索与应用^[113]。

3.5 量子衍生算法

量子计算算法理论的另一重要方向是量子衍生技术,其利用量子信息学原理改进经典计算中信息处理方式,本质在于利用量子特性在经典计算机上实现信息处理和高性能计算。自从1995年量子神经计算被S. C.Kak提出^[114],量子衍生技术涌现出一系列相关算法研究,按照在电力领域的发展研究现状,在表2汇总归纳出具体研究问题及算法优缺点^[115-160]。近10年来,学者不断将量子衍生技术与具体问题研究背景相结合,在电力及能源系统的优化规划、运行控制、故障诊断等方面形成一系列研究成果,展示出理论方法的适用性与可行性。

4 量子信息学在电力系统中发展的展望

尽管量子信息学已发展了近半个世纪,但是其在电力系统中的研究工作才刚起步,构建量子安全的新型电力系统大有可为。本文对未来新型电力系统中量子信息学进一步发展需要解决的问题和研究方向进行了展望。

4.1 继续加强关键核心技术的攻关

量子通信在理论上已较为成熟,但在电力系统中还需要针对工程应用的实际需求发展相关核心技术。而由于噪声、错误以及量子退相干效应的影响,虽然目前量子计算机不具备大规模计算所需的稳定纠错能力,只能进行前沿技术或理论探索研

表 2 各类量子衍生算法在电力领域中的研究现状

Table 2 Research status of various quantum derivative algorithms in electric power field		
量子衍生算法分类	研究现状	优势与缺陷
量子粒子群优化算法	参数辨识 ^[115] 、经济调度 ^[116] 、能量优化管理 ^[117] 、故障诊断 ^[118] 、负荷聚类 ^[119] 、负荷预测 ^[120] 、机组组合 ^[121] 、谐波估计 ^[122]	算法框架简洁，控制参数较少，但易陷入局部最优
	经济调度 ^[123] 、发电机物理场计算 ^[124] 、配电网 WSN 在线监测与路由算法 ^[125] 、电力通信网路由选择策略 ^[126]	性能稳定较完善，但普适性不足，编码效率低
量子蚁群算法	输电网规划 ^[127] 、分布式电源优化配置 ^[128]	不易陷入早熟，搜索能力强，但收敛速度慢、精度较低
量子人工鱼群算法	电网优化重构 ^[129] 、多目标无功优化 ^[130] 、最优潮流 ^[131] 、能量管理与优化配置 ^[132]	有效处理高维问题，收敛速度快，鲁棒性强，量子编码的特性考虑不足，算法执行不稳定
量子蜂群优化算法	潮流计算 ^[133] 、经济调度 ^[134]	模型具备简洁化、含参少、通用性特征，但收敛慢，易陷入局部最优
量子布谷鸟搜索算法	无功优化 ^[135]	参数较少，进化过程简单，全局搜索能力强，但收敛性差，易早熟
量子混合蛙跳算法	经济调度 ^[136] 、网络重构 ^[137]	实现全局和局部搜索之间的平衡，收敛快，但计算精度低，易陷入局部最优
量子萤火虫算法	电力负荷预测 ^[138] 、负荷经济调度 ^[139] 、排放经济调度 ^[140]	
量子神经网络算法	故障诊断 ^[141] 、负荷预测 ^[142] 、电价预测 ^[143] 、绝缘闪络电压预测 ^[144] 、稳定性评估 ^[145]	利用并行计算特性，精度及收敛速度提高，容错性提升，如何针对大规模网络结构问题进行训练有待研究
量子进化算法	电网设施优化规划 ^[146,147] 、无功优化 ^[148] 、机组组合 ^[149] 、储能容量优化配置 ^[150] 、参数辨识 ^[151] 、短路电流优化策略 ^[152] 、避免早熟收敛，提高全局寻优能力，但用量子比特位表示基因而不方便对染色体进行传统的交叉和变异操作	利用量子逻辑门实现染色体的演化，收敛速度快，有效避免早熟收敛，提高全局寻优能力，但用量子比特位表示基因而不方便对染色体进行传统的交叉和变异操作
	可靠性评估 ^[153] 、无功电压控制 ^[154] 、功率预测 ^[155]	
量子差分进化算法	能源优化调度 ^[156] 、无功优化 ^[157] 、故障管理 ^[158] 、机组组合 ^[159] 、分布式电源协调优化 ^[160]	引入量子位概率特性，提高搜索性能和寻优效率，提高如何设计有效的编码方式和更高效的进化策略是重点和难点

究。但是量子计算的纠错能力和计算规模在飞速发展，在可预见的未来其实用化、产业化均具备极大可能。关于量子计算在电力系统中的探索可以为以上前景应用打下预研究基础。

4.1.1 量子通信

量子实时通信技术。电力系统对通信的质量要求很高，电网通信必须满足低时延、高可靠的要求。当前量子密钥生成的速率还远远不足以匹配电力系统大体量数据的传输，常用的解决方式是设置密钥池提前并储存密钥。但这不仅增加了密钥被泄露的风险，也极大破坏了密钥的同步性。因此亟需通过测试选定适当的方案来支持实时通信的要求。

多主体量子通信技术。量子密钥分发协议在诞生之初主要聚焦通信安全性问题，对大规模复杂网络场景应用探索较少。而电力系统作为世界上规模最大的人造系统，运行过程中涉及的终端数目难以估计，加之复杂多变的拓扑结构，简单沿用现有的量子通信机制是不可行的。聚焦发展点对多点的通信机制，将其扩展为适合多主体灵活通信的复杂拓扑结构的网络，是将量子通信应用在电力系统的特色且有挑战的开放科学问题。

量子通信抗干扰技术。量子通信的绝对安全性

是基于特定模型得到的，而实际工程中所用的设备可能存在一系列安全漏洞。在物理层面，窃听者可以通过直接攻击量子通信链路中的量子态测量仪、密钥存储器、中继器等设备获取信息。发展测量设备独立的、甚至是设备独立的量子通信协议可以解决这一问题。在信息层面，现有的通信协议能够杜绝被动攻击，但是对于拒绝服务(denial of service, DoS)、篡改信息、资源占用、身份伪造等主动信息攻击还缺少应对。所以针对政府、控制中心、灾后恢复中心等需要极高的信息可靠性的场所，可以按照事件前、事件中、事件后的顺序分阶段制定防御措施，加固薄弱环节，从多方面提升电力系统量子通信网的抗干扰水平。

4.1.2 量子计算

依据量子信息原理构建的量子算法相对于经典算法在计算效率提升方面具备发展潜力，如量子傅里叶变换相对经典离散傅里叶变换可实现指数加速，在特征提取和模式识别等方面用途广泛，量子搜索算法在全局优化、数据库搜索等问题中加速优势明显。很多量子算法在各类问题中可明显降低计算复杂度，若将量子计算应用到潮流计算、暂态分析和状态估计等问题中，有望提高计算和评估速

度,对保障电网的安全稳定运行具有重要意义。此外,随着大量新能源并网及海量设备接入,电力系统规模的急剧扩大,系统规划方案和调度运行策略的制定优化过程日趋复杂,包含众多复杂约束条件的优化问题求解可行性及结果的合理性成为不可回避的重点和难点。目前利用量子加速优势解决电力系统优化问题的理论研究十分有限,现有的量子优化算法主要针对常见的凸优化问题,关于非凸问题和包含更多约束条件的实际应用优化问题的研究很少。因此电力系统复杂优化问题的求解需要量子优化带来新思路,加强量子优化的适用性十分必要。

纯粹的量子算法需要大量量子资源和深度量子线路。结合现在量子计算硬件的发展,较为可行的现存方案是混合量子-经典算法,或与经典机器学习等方法组合应用。但这些混合算法能在降低计算复杂度中发挥多大作用,以及当量子计算硬件发展到何种程度时可以完全超越经典算法,仍有待研究。为了推进可实用化量子计算在电力系统中的应用,以上研究问题需要深度探索。

4.2 更多聚焦电力系统主网的研究

现有量子通信研究多集中于配网和微网,对于规模更大、结构更复杂的电力系统主网还缺少具有针对性的研究。相较于配网,电力系统主网在源-网-荷-储各环节均涉及到更多的控制要求,是十分富有挑战性的全新应用场景。

高比例新能源的接入和电力电子设备的大面积应用在为系统带来灵活可控特性的同时也引入了不确定性,提高了系统安全稳定运行的难度。广泛分布的智能量测设备和智能控制终端需要可靠的通信系统完成信息传递。我们需要结合电力系统特点,利用固有的设施资源将大规模从劣势转为优势,构建适用于主网系统的量子通信架构。可以根据不同业务需求选择合适的加密算法,节约通信资源,形成多种加密算法并存的高效量子通信网;采用混合网络的方式,利用量子安全性重点确保关键用户之间的通信安全,在安全性和经济性之间寻求平衡;依托现有电力通信网的层级框架,在控制中心增加能够实现量子密钥分发和担任可信任机构的量子模块,巧妙运用其中心特性完成点对多点的架构转换。

4.3 合理规划量子电力通信网的发展路径

构建电力系统量子通信网是一项繁杂艰巨的任务,不可能一蹴而就,需要合理规划其发展路径。

分模块对电力系统进行改造,在现有工程技术的基础上逐步设计可行的量子建设方案甚至是过渡方案也是前进的一种方向。

价格高昂是量子网络难以大规模推广的原因之一,而在量子建设中测量设备和量子生成设备占据了大部分的预算。传统的量子网络默认每个通信主体都要安装全套的量子设备,具备生成、收发和测量量子比特的能力,但这一点在电力系统中显然无法实现。因此可以考虑半量子网络的方案,选择关键通信主体和节点增加量子模块,普通节点仍保留经典通信特性,只在某种限定下用传统的方式和量子信道实现信息交互即可。

另一方面,将量子系统赋予新的作用也能提升其实用价值。量子密钥分发系统可以承担单光子干涉仪的任务,作为光纤传感器探测极端环境。这样在降低建设成本的同时提高量子设施的利用价值,才能进一步推动量子通信网在电力系统中的应用。

4.4 注重开发与测试环境的研发

实现量子计算在电力系统的规模化应用,不仅要在算法性能、允许误差等技术层面有所突破,拥有一套易于开发、调试、部署的编译环境和方便快捷的编程语言也尤为重要。

电力系统仿真计算往往涉及求解大规模微分方程组,而电力系统规划与优化运行问题也包含复杂约束与目标函数,若没有统一的编译环境和成熟的硬件支持,只针对特定问题设计量子电路或者编写程序,则不利于电力系统扩大规模和变换不同场景下的问题求解。Qurator作为国内首个量子程序集成开发环境,能够满足编译器、编程框架、复杂编程开发环境的安装与配置,但依旧需要工程领域的持续探索。在量子编程语言上,相较于全球用户量最大的Qiskit、Q#、Cirq、PyQuil,国内量子编译技术和软件处于起步阶段,如QPanda、HiQ、量易伏、Quingo等,但在与应用相结合、编译框架的设计等方面独具创新和潜力。量子计算技术迅猛的发展趋势,给量子规模化应用带来了机遇和希望,但同时也需要编译环境的持续进步和完善。

已有的量子网络仿真软件和测试平台能够根据实现特定量子密钥分发协议在电力系统中的模拟,但仍缺少对实际电力系统运行场景仿真和测试平台,亟需进一步搭建更加贴近实际电力量子通信网的测试平台。首先,目前可用于实现量子通信过程的技术已经远远超过了传统密钥分发协议的范

畴,量子直接通信、移动量子密钥储存设备、基于位置的量子加密等技术都对量子模拟器提出了全新的要求。其次,通信网络和电力网络的结合也是需要重点聚焦的问题,需要将量子通信网和电力系统实时模拟器有机结合起来,更多考虑工程中存在的传输损耗、设备故障、运行方式切换等问题。另外,在搭建测试平台时需要充分参考真实电网的框架设计和设备选型,通过在已有设备中增添量子模块的形式增强平台的可扩展性和普适性。

4.5 持续跟踪量子测量与感知等前沿技术进展

未来,新型电力系统能源供应与负荷主体数量庞大且透明化趋势日益明显,系统的状态评估、安全运行、设备监测与故障分析等等很大程度上依赖海量信号的实时采集、数据传输、处理分析过程。量子测量采用量子态形式存储并处理信息,基于量子信息学原理大幅提升并行计算能力,有望在电力系统运行控制数据采集、实时性数据传输与转化、源网荷储各环节与多时间尺度数据处理分析等方面凸显量子优势。量子感知是基于微观粒子的量子态,对被测系统的物理量开展精密测量,目前国网安徽省电力公司牵头研制的世界首台量子电流互感器在合肥挂网运行。发展并利用量子感知技术可制备高敏感度及高精度传感器,便于多特征多类型数据信号的探测与收集,进一步增强电力系统对设备运行状态全面感知与智能诊断能力,促进我国电力装备制造业的升级。

5 结论

量子信息学是一门融合了量子力学与经典信息学的交叉学科,能够基于量子力学的物理特性实现优于传统学科的信息传输和处理能力,是解决新型电力系统的信息安全传输和信息高效处理需求的极具潜力理论工具。

量子通信利用测不准原理、不可克隆定理和测量坍塌理论来实现严格的加密信息传输,量子计算利用量子的叠加特性来提升算法并行优越性和信息处理效率。虽然量子信息学在电力领域中的应用研究已经起步,但仍存在大量研究空白,有待在核心技术攻关方面持续投入,推进电力系统中量子通信的实用化和标准化工作,加强电力系统专用的量子计算基础设施建设。

在新型电力系统构建过程中,需立足我国量子科技发展战略谋划和系统布局,大力发展量子信息

学在电力系统中应用的研究,为实现“双碳”目标和维护能源安全筑牢电力防线。

参考文献

- [1] 舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1663-1672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1672(in Chinese).
- [2] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819(in Chinese).
- [3] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-475(in Chinese).
- [4] 王成山,董博,于浩,等.智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1597-1607.
WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1607(in Chinese).
- [5] 蒲天骄,陈盛,赵琦,等.能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2012-2028.
PU Tianjiao, CHEN Sheng, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2028(in Chinese).
- [6] 李鹏,习伟,蔡田田,等.数字电网的理念、架构与关键技术[J].中国电机工程学报,2022,42(14):5001-5016.
LI Peng, XI Wei, CAI Tiantian, et al. Concept, architecture and key technologies of digital power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5001-5016(in Chinese).
- [7] BENENTI G, CASATI G, STRINI G. Principles of quantum computation and information[M]. Hackensack, N. J: World Scientific Publishing Company, 2004.
- [8] All Member States now committed to building an EU

- quantum communication infrastructure | Shaping Europe's digital future [EB/OL]. (2021-07-28) [2022-10-11]. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/all-member-states-now-committed-building-eu-quantum-communication-infrastructure>.
- [9] HOUSE T W. Memorandum on improving the cybersecurity of national security, department of defense, and intelligence community systems[EB/OL]. (2022-01-19)[2022-10-11]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/01/19/memorandum-on-improving-the-cybersecurity-of-national-security-department-of-defense-and-intelligence-community-systems/>.
- [10] HOUSE T W. Executive order on enhancing the national quantum initiative advisory committee[EB/OL]. (2022-05-04)[2022-10-11]. <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/05/04/executive-order-on-enhancing-the-national-quantum-initiative-advisory-committee/>.
- [11] HUGGINS W J, O' GORMAN B A, RUBIN N C, et al. Unbiasing fermionic quantum Monte Carlo with a quantum computer[J]. Nature, 2022, 603(7901): 416-420.
- [12] IBM quantum computing[EB/OL]. [2022-09-19]. <https://www.ibm.com/quantum?lnk=hpv18ct18>.
- [13] 池亚平, 陈纯霞, 王志强. 量子保密通信网络组网技术研究进展[J]. 北京电子科技学院学报, 2019, 27(2): 9-18.
- CHI Yaping, CHEN Chunxia, WANG Zhiqiang. Advances in networking technology of quantum secure communication network[J]. Journal of Beijing Electronic Science and Technology Institute, 2019, 27(2): 9-18(in Chinese).
- [14] PEEV M, PACHER C, ALLÉAUME R, et al. The SECOQC quantum key distribution network in Vienna[J]. New Journal of Physics, 2009, 11(7): 075001.
- [15] 傅思良, 李凯迪, 于天剑, 等. 基于连续变量量子通信的地铁量子调度网络研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(6): 1521-1529.
- FU Siliang, LI Kaidi, YU Tianjian, et al. Metro dispatching network using continuous-variable quantum communication[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(6): 1521-1529(in Chinese).
- [16] 新华网. 十年十倍! 中国“墨子号”实现 1200 公里地表量子态传输新纪录[EB/OL]. (2022-05-06) [2022-09-19]. http://www.news.cn/2022-05/06/c_1128626854.htm. www.news.cn. Ten times in ten years! China “Micius” achieved a new period of 1200km surface quantum state transmission [EB/OL]. (2022-05-06)[2022-09-19]. http://www.news.cn/2022-05/06/c_1128626854.htm(in Chinese).
- [17] WEN Xiaojun, NIE Zhe. An E-payment system based on quantum blind and group signature[C]//2010 Second International Symposium on Data, Privacy, and E-Commerce. Buffalo: IEEE, 2010: 50-55.
- [18] TSCHORSCH F, SCHEUERMANN B. Bitcoin and beyond: A technical survey on decentralized digital currencies[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(3): 2084-2123.
- [19] 彭承志, 潘建伟. 量子科学实验卫星——“墨子号”[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(9): 1096-1104.
- PENG Chengzhi, PAN Jianwei. Quantum science experimental satellite “Micius” [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(9): 1096-1104(in Chinese).
- [20] 郭光灿, 韩永健, 史保森. 量子信息[J]. 科学观察, 2022, 17(3): 1-4.
- GUO Guangcan, HAN Yongjian, SHI Baosen. Quantum information[J]. Science Focus, 2022, 17(3): 1-4(in Chinese).
- [21] KONG Pengyong. A review of quantum key distribution protocols in the perspective of smart grid communication security[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1): 41-54.
- [22] TANG Zefan, QIN Yanyuan, JIANG Zimin, et al. Quantum-secure networked microgrids[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [23] TANG Zefan, QIN Yanyuan, JIANG Zimin, et al. Quantum-secure microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1250-1263.
- [24] LI Yuancheng, ZHANG Pan, HUANG Rong. Lightweight quantum encryption for secure transmission of power data in smart grid[J]. IEEE Access, 2019, 7: 36285-36293.
- [25] 瞿迪庆, 张万生, 余侃, 等. 量子安全增强的电力 5G 配网终端技术测试与研究[J]. 网络空间安全, 2022, 13(1): 55-61.
- QU Diqing, ZHANG Wansheng, YU Kan, et al. Testing and research on quantum security enhanced power 5G distribution network terminals[J]. Cyberspace Security, 2022, 13(1): 55-61(in Chinese).
- [26] FENG Fei, ZHOU Yifan, ZHANG Peng. Quantum power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3810-3812.
- [27] FENG Fei, ZHANG Peng, BRAGIN M A, et al. Novel resolution of unit commitment problems through quantum surrogate lagrangian relaxation[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022: 1-12. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3181221>.
- [28] ZHOU Yifan, FENG Fei, ZHANG Peng. Quantum electromagnetic transients program[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3813-3816.
- [29] ZHOU Yifan, ZHANG Peng. Noise-resilient quantum machine learning for stability assessment of power

- systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 475-487.
- [30] ESKANDARPOUR R, GHOSH K J B, KHODAEI A, et al. Quantum-enhanced grid of the future: a primer[J]. IEEE Access, 2020, 8: 188993-189002.
- [31] ULLAH M H, ESKANDARPOUR R, ZHENG Honghao, et al. Quantum computing for smart grid applications [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(21): 4239-4257.
- [32] Trustworthy cyber infrastructure for the power grid [EB/OL]. [2022-10-03]. <http://www.tcipg.org/about-us.html>.
- [33] ALSHOWKAN M, EVANS P G, STARKE M, et al. Authentication of smart grid communications using quantum key distribution[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 12731.
- [34] ID quantique-the home of quantum-safe crypto[EB/OL]. [2022-10-03]. <https://www.idquantique.com/>.
- [35] Home| Quantum cybersecurity from quintessence labs [EB/OL]. [2022-10-03]. <https://www.quintessencelabs.com>.
- [36] 宁波首条量子加密无线通信架空线路在江北投用 [EB/OL]. (2021-11-17)[2022-10-03]. http://www.nbjb.gov.cn/art/2021/11/17/art_1229105125_58933852.html.
- [37] 算法周刊·前沿扫描 | 量子破解“电力孤岛”, 赋能电网系统[EB/OL]. (2022-05-15)[2022-10-10]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_17797502.
www.thepaper.cn. Algorithm weekly · frontier scanning | quantum cracking "power island", empowering power grid systems [EB/OL]. (2022-05-15) [2022-10-10]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_17797502 (in Chinese).
- [38] 张永德. 量子信息物理原理[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
ZHANG Yongde. Principles of quantum information physics[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2006.
- [39] FRIEDMAN J R, PATEL V, CHEN W, et al. Quantum superposition of distinct macroscopic states[J]. Nature, 2000, 406(6791): 43-46.
- [40] BUŽ EK V, HILLERY M. Optimal manipulations with qubits: Universal quantum entanglers[J]. Physical Review A, 2000, 62(2): 022303.
- [41] LO H K, CHAU H F. Unconditional security of quantum key distribution over arbitrarily long distances [J]. Science, 1999, 283(5410): 2050-2056.
- [42] EINSTEIN A, PODOLSKYB, ROSEN N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?[J]. Physical Review Journals Archive, 1935, 47(10): 777-780.
- [43] WOOTTERS W K, ZUREK W H. A single quantum cannot be cloned[J]. Nature, 1982, 299(5886): 802-803.
- [44] ELKOUSS D, MARTINEZ-MATEO J, CIURANA A, et al. Secure optical networks based on quantum key distribution and weakly trusted repeaters[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(4): 316-328.
- [45] 韩永建, 李传锋, 郭光灿. 量子计算原理及研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(23): 70-75.
HAN Yongjian, LI Chuanfeng, GUO Guangcan. The principle and development of quantum computation [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(23): 70-75(in Chinese).
- [46] BARENCO A, BENNETT C H, CLEVE R, et al. Elementary gates for quantum computation[J]. Physical Review A, 1995, 52(5): 3457-3467.
- [47] FARHI E, GOLDSTONE J, GUTMANN S, et al. Quantum computation by adiabatic evolution [Z]. arXiv: quant-ph/0001106, 2000.
- [48] RAUSSENDORF R, BRIEGEL H J. A one-way quantum computer[J]. Physical Review Letters, 2001, 86(22): 5188-5191.
- [49] KITAEV A Y. Fault-tolerant quantum computation by anyons[J]. Annals of Physics, 2003, 303(1): 2-30.
- [50] 欧清海, 王盛鑫, 余蕊, 等. 面向新型电力系统的电力通信网需求及应用场景探索[J]. 供用电, 2022, 39(2): 2-8, 21.
OU Qinghai, WANG Shengxin, SHE Rui, et al. Exploration of power communication network requirements and applications scenarios for new power systems[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(2): 2-8, 21(in Chinese).
- [51] 薛禹胜, 李满礼, 罗剑波, 等. 基于关联特性矩阵的电网信息物理系统耦合建模方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 11-19.
XUE Yusheng, LI Manli, LUO Jianbo, et al. Modeling method for coupling relations in cyber physical power systems based on correlation characteristic matrix [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 11-19(in Chinese).
- [52] 贾耕涛, 倪玮栋, 吴佳伟, 等. 面向能源互联网的电力量子保密通信关键技术研究及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(7): 1-7.
JIA Gengtao, NI Weidong, WU Jiawei, et al. Research and application of key technologies of quantum secure communication in energy interconnection[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(7): 1-7(in Chinese).
- [53] ZHANG Zheshen, ZENG Guihua, ZHOU Nanrun, et al. Quantum identity authentication based on ping-pong

- technique for photons[J]. *Physics Letters A*, 2006, 356(3): 199-205.
- [54] PIRONIO S, ACÍN A, MASSAR S, et al. Random numbers certified by bell's theorem[J]. *Nature*, 2010, 464(7291): 1021-1024.
- [55] BENNETT C H, BRASSARD G. Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing[J]. *Theoretical Computer Science*, 2014: 560: 7-11.
- [56] EKERT A K. Quantum cryptography based on Bell's theorem[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(6): 661-663.
- [57] BLUHM A, CHRISTANDL M, SPEELMAN F. A single-qubit position verification protocol that is secure against multi-qubit attacks[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(6): 623-626.
- [58] REICHARDT B W, UNGER F, VAZIRANI U. Classical command of quantum systems via rigidity of CHSH games[Z]. arXiv preprint arXiv: 1209.0449, 2012.
- [59] 王丽萍, 戚艳红. 基于编码的后量子公钥密码研究进展[J]. *信息安全学报*, 2019, 4(2): 20-28.
WANG Liping, QI Yanhong. Recent progress of code-based post-quantum public key cryptography [J]. *Journal of Cyber Security*, 2019, 4(2): 20-28(in Chinese).
- [60] HAN Lianfang, LIU Yimin, LIU Jun, et al. Multiparty quantum secret sharing of secure direct communication using single photons[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(9): 2690-2694.
- [61] ZHANG Haoran, SUN Zhen, QI Ruoyang, et al. Realization of quantum secure direct communication over 100km fiber with time-bin and phase quantum states[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 83.
- [62] 裴晓芳, 江雷鸣, 瞿治国. 基于连续变量 GHZ 态的三方量子身份认证[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(21): 12-16.
PEI Xiaofang, JIANG Leiming, QU Zhiguo. Three-party quantum identity authentication based on continuous-variable GHZ state[J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(21): 12-16(in Chinese).
- [63] 聂敏, 尚鹏钢, 杨光, 等. 中尺度沙尘暴对量子卫星通信信道的影响及性能仿真[J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 240303.
NIE Min, SHANG Penggang, YANG Guang, et al. Influences of mesoscale sandstorm on the quantum satellite communication channel and performance simulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 240303(in Chinese).
- [64] PENG Chengzhi, YANG Tao, BAO Xiaohui, et al. Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13 km: towards satellite-based global quantum communication[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 150501.
- [65] BOURGOIN J P, MEYER-SCOTT E, HIGGINS B L, et al. Corrigendum: A comprehensive design and performance analysis of low Earth orbit satellite quantum communication(2013 New J. Phys. 15 023006)[J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(6): 069502.
- [66] SANGOUARD N, SIMON C, DE RIEDMATTEN H, et al. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2011, 83(1): 33-80.
- [67] BRIEGEL H J, DÜR W, CIRAC J I, et al. Quantum repeaters: The role of imperfect local operations in quantum communication[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(26): 5932-5935.
- [68] YIN Xiaohua, PAN Dedong, YU Hai, et al. Research of long-distance encrypted signal transmission enhancement method based on quantum communication power system[C]//2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). Beijing, China: IEEE, 2018: 403-405.
- [69] TANG Zefan, ZHANG Peng, KRAWEC W, et al. Quantum networks for resilient power grids: theory and simulated evaluation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023, 38(2): 1189-1204.
- [70] AMER O, KRAWEC W O, WANG Bing. Efficient routing for quantum key distribution networks[C]//2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering(QCE). Denver, CO, USA: IEEE, 2020: 137-147.
- [71] 陈智雨, 高德荃, 王栋, 等. 面向能源互联网的电力量子保密通信系统性能评估[J]. *计算机研究与发展*, 2017, 54(4): 711-719.
CHEN Zhiyu, GAO Dequan, WANG Dong, et al. Performance evaluation of power quantum secure communication system for energy internet[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2017, 54(4): 711-719(in Chinese).
- [72] 江秀臣, 许永鹏, 李曜丞, 等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. *高电压技术*, 2022, 48(1): 1-10.
JIANG Xiuchen, XU Yongpeng, LI Yaocheng, et al. Digitalization transformation of power transmission and transformation under the background of new power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(1): 1-10(in Chinese).
- [73] ELLIOTT C, COLVIN A, PEARSON D, et al. Current status of the DARPA quantum network(Invited Paper)[C]//Proceedings Volume 5815, Quantum Information and computation III. Orlando: SPIE, 2005: 138-149.
- [74] Home[Chicago quantum exchange[EB/OL]. [2022-09-20]. <https://chicagoquantum.org/>.
- [75] PATEL K A, DYNES J F, CHOI I, et al. Coexistence of

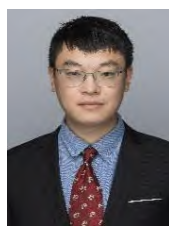
- high-bit-rate quantum key distribution and data on optical fiber[J]. *Physical Review X*, 2012, 2(4): 041010.
- [76] ZHANG Ruirui, CHEN Xi. Prospects of fiber quantum key distribution technology for power systems[C]//22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution(CIRED 2013). Stockholm, Sweden: IET, 2013: 1-4.
- [77] WANG Licheng, WANG Dongshan, GAO Jian, et al. Research on multi-source data security protection of smart grid based on quantum key combination[C]//2019 IEEE 4th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis(ICCCBDA). Chengdu, China: IEEE, 2019: 449-453.
- [78] 王东山, 李温静, 苑佳楠, 等. 面向电力通信接入网的量子密钥交互机制[J]. *供用电*, 2019, 36(8): 36-40, 90.
- WANG Dongshan, LI Wenjing, YUAN Jia'nan, et al. Quantumkey interaction mechanism for power communication access network[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(8): 36-40, 90(in Chinese).
- [79] DIOVU R C, AGEE J T. Enhancing the security of a cloud - based smart grid AMI network by leveraging on the features of quantum key distribution[J]. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2019, 30(6): e3587.
- [80] TAKEI N, AOKI T, KOIKE S, et al. Experimental demonstration of quantum teleportation of a squeezed state[J]. *Physical Review A*, 2005, 72(4): 042304.
- [81] HUO Meiru, QIN Jiliang, CHENG Jialin, et al. Deterministic quantum teleportation through fiber channels[J]. *Science Advances*, 2018, 4(10): eaas9401.
- [82] BEBROV G, DIMOVA R, PENCHEVA E. Quantum approach to the information privacy in Smart Grid[C]//2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment(OPTIM)&2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics(ACEMP). Brasov, Romania: IEEE, 2017: 971-976.
- [83] 2022 年上半年通信业经济运行情况[EB/OL]. (2022-07-25)[2022-09-20]. https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/txy/art/2022/art_185ae0fd6e4b4631b68dc241e6df6ce4.html.
- [84] Computer Security Resource Center. Post-quantum cryptography standardization-post-quantum cryptography [EB/OL]. [2022-10-04]. <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>.
- [85] JIN D, LIN S. *Advances in electronic engineering, communication and management vol.1*[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012: 651-656.
- [86] HUGHES R J, NORDHOLT J E, MCCABE K P, et al. Network-centric quantum communications with application to critical infrastructure protection [J]. *Computer Science*, 2013, DOI: 10.48550/arXiv.1305.0305.
- [87] JIANG Zimin, TANG Zefan, QIN Yanyuan, et al. Quantum internet for resilient electric grids [J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31(6): e12911.
- [88] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(10): 18-32.
- GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(10): 18-32(in Chinese).
- [89] Welcome to the SQUANCH documentation[EB/OL]. [2022-08-26]. <http://att-innovate.github.io/squanch/index.html>.
- [90] LARDIER W, VARO Q, YAN Jun. Quantum-sim: an open-source co-simulation platform for quantum key distribution-based smart grid communications[C]//2019 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (Smart Grid Comm). Beijing, China: IEEE, 2019: 1-6.
- [91] COOPMANS T, KNEGJENS R, DAHLBERG A, et al. NetSquid, a network simulator for quantum information using discrete events[J]. *Communications Physics*, 2021, 4(1): 164.
- [92] DIADAMO S, NÖTZEL J, ZANGER B, et al. QuNetSim : a software framework for quantum networks[J]. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 2021, 2: 1-12.
- [93] BUB J. *Quantum information and computation*[M]// BUTTERFIELD J, EARMAN J. *Philosophy of Physics*. Amsterdam: NorthHolland, 2007: 555-660.
- [94] AJAGEKAR A, YOU Fengqi. Quantum computing for energy systems optimization : Challenges and opportunities[J]. *Energy*, 2019, 179: 76-89.
- [95] ARUTE F, ARYA K, BABBUS R, et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor[J]. *Nature*, 2019, 574(7779): 505-510.
- [96] HARROW A W, HASSIDIM A, LLOYD S. Quantum algorithm for linear systems of equations[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(15): 150502.
- [97] ESKANDARPOUR R, GOKHALE P, KHODAEI A, et al. Quantum computing for enhancing Grid security [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(5): 4135-4137.
- [98] 凌佳杰, 耿光超, 江全元. 基于变分量子算法的电力系统潮流计算[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(1): 28-37.
- LING Jiajie, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan.

- Power flow calculation of power system based on variable quantum algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 28-37 (in Chinese).
- [99] ZHOU Yifan, ZHANG Peng, FENG Fei. Noisy-intermediate-scale quantum electromagnetic transients program[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022: 1[2022-10-09]. <http://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3172655>.
- [100] FENG Fei, ZHANG Peng, ZHOU Yifan, et al. Quantum microgrid state estimation[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 212: 108386.
- [101] FINNILA A B, GOMEZ M A, SEBENIK C, et al. Quantum annealing: A new method for minimizing multidimensional functions[J]. Chemical Physics Letters, 1994, 219(5-6): 343-348.
- [102] FARHI E, GOLDSTONE J, GUTMANN S. A quantum approximate optimization algorithm[Z]. arXiv:1411.4028, 2014.
- [103] FARHI E, HARROW A W. Quantum supremacy through the quantum approximate optimization algorithm [Z]. arXiv: 1602.07674, 2016.
- [104] KORETSKY S, GOKHALE P, BAKER J M, et al. Adapting quantum approximation optimization algorithm (QAOA) for unit commitment[C]//2021 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE). Broomfield, CO, USA: IEEE, 2021.
- [105] NIKMEHR N, ZHANG Peng, BRAGIN M A. Quantum distributed unit commitment: an application in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3592-3603.
- [106] MAHROO R, KARGARIAN A. Hybrid quantum-classical unit commitment[C]//2022 IEEE Texas Power and Energy Conference(TPEC). College Station, TX, USA: IEEE, 2022.
- [107] JONES E B, KAPIT E, CHANG CY, et al. On the computational viability of quantum optimization for PMU placement[C]//2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020.
- [108] HIDARY D R, LIBENSON S. The application of QAOA on a cloud-based quantum computer for clean energy grid optimization[J/OL]. (2020)[2022-09-25]. https://www.academia.edu/44397754/The_Application_of_QAOA_on_a_Cloud_based_Quantum_Computer_for_Clean_Energy_Grid_Optimization.
- [109] 黄一鸣, 雷航, 李晓瑜. 量子机器学习算法综述[J]. 计算机学报, 2018, 41(1): 145-163.
- HUANG Yiming, LEI Hang, LI Xiaoyu. A survey on quantum machine learning[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(1): 145-163(in Chinese).
- [110] AJAGEKAR A, YOU Fengqi. Quantum computing based hybrid deep learning for fault diagnosis in electrical power systems[J]. Applied Energy, 2021, 303: 117628.
- [111] BRASSARD G, HOYER P, MOSCA M, et al. Quantum amplitude amplification and estimation[Z]. arXiv:quant-ph/0005055, 2000.
- [112] LEE J S, KIM J, CHEONG Y, et al. Implementation of phase estimation and quantum counting algorithms on an NMR quantum-information processor[J]. Physical Review A, 2002, 66(4): 042316.
- [113] NIKMEHR N, ZHANG Peng. Quantum-inspired power system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022: 1-14[2022-10-09]. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2022.3204393>.
- [114] KAK S C. Quantum neural computing[J]. Advances in Imaging and Electron Physics, 1995, 94: 259-313.
- [115] 王振树, 卞绍润, 刘晓宇, 等. 基于混沌与量子粒子群算法相结合的负荷模型参数辨识研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 211-217.
- WANG Zhenshu, BIAN Shaorun, LIU Xiaoyu, et al. Research on load model parameter identification based on the CQDPSO algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 211-217(in Chinese).
- [116] ZHAO Xingang, ZHANG Zeqi, XIE Yimin, et al. Economic-environmental dispatch of microgrid based on improved quantum particle swarm optimization [J]. Energy, 2020, 195: 117014.
- [117] 闫占新, 刘俊勇, 魏震波, 等. 多能源等效替代方式及其转移效益模型[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1620-1626.
- YAN Zhanxin, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Investigation on multi-energy equivalent substitution mode and transition benefit model[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1620-1626(in Chinese).
- [118] 李晓, 黄纯. 电力系统故障诊断的量子粒子群优化算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(4): 61-66.
- LI Xiao, HUANG Chun. Quantum-behaved particle swarm optimization algorithm for power fault section estimation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2011, 23(4): 61-66(in Chinese).
- [119] 张少敏, 赵硕, 王保义. 基于云计算和量子粒子群算法的电力负荷曲线聚类算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 93-98.
- ZHANG Shaomin, ZHAO Shuo, WANG Baoyi. Research of power load curve clustering algorithm based on cloud computing and quantum particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control,

- 2014, 42(21): 93-98(in Chinese).
- [120] SONG Wanqing, CATTANI C, CHI C H. Multifractional Brownian motion and quantum-behaved particle swarm optimization for short term power load forecasting: An integrated approach[J]. *Energy*, 2020, 194: 116847.
- [121] 吴小珊, 张步涵, 袁小明, 等. 求解含风电场的电力系统机组组合问题的改进量子离散粒子群优化方法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(4): 45-52.
- WU Xiaoshan, ZHANG Buhan, YUAN Xiaoming, et al. Solutions to unit commitment problems in power systems with wind farms using advanced quantum-inspired binary PSO[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(4): 45-52(in Chinese).
- [122] WAQAS A B, SAIFULLAH Y, ASHRAF M M. A hybrid quantum inspired particle swarm optimization and least square framework for real-time harmonic estimation[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(6): 1548-1556.
- [123] 张智晟, 樊秀娟, 林涛. 基于量子蚁群优化算法的梯级水电系统经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2010, 30(10): 17-21.
- ZHANG Zhisheng, FAN Xiujuan, LIN Tao. Economic dispatch of cascaded hydropower system based on quantum ant colony optimization algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2010, 30(10): 17-21(in Chinese).
- [124] 殷巧玉, 李伟力, 张晓晨. 高速永磁发电机冷却流道结构双维度连续量子蚁群优化的温度场计算[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(36): 77-85.
- YIN Qiaoyu, LI Weili, ZHANG Xiaochen. Analysis on temperature fields in HSPMG with grooves two dimensional optimal designed by continuous quantum ant colony optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(36): 77-85(in Chinese).
- [125] YANG Jia, WU Yingxu, XU Qiang, et al. Online monitoring and routing algorithm for WSN in smart distribution network based on quantum ant colony[C]// 2019 Chinese Automation Congress(CAC). Hangzhou, China: IEEE, 2019.
- [126] 曾瑛, 蒋康明, 杨娇, 等. 基于量子遗传算法的电力通信网路由选择策略[J]. *太原理工大学学报*, 2013, 44(4): 501-505.
- ZENG Ying, JIANG Kangming, YANG Jiao, et al. Routing algorithm based on quantum genetic algorithm in power communication network[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2013, 44(4): 501-505(in Chinese).
- [127] 王林川, 李传虎, 罗晓辉, 等. 基于量子人工鱼群混合算法的输电网规划[J]. *华中电力*, 2009, 22(6): 1-4.
- WANG Linchuan, LI Chuanhu, LUO Xiaohui, et al. Transmission network planning based on quantum artificial fish swarm hybrid algorithm[J]. *Central China Electric Power*, 2009, 22(6): 1-4(in Chinese).
- [128] DU Tingsong, HU Yang, KE Xianting. Improved quantum artificial fish algorithm application to distributed network considering distributed generation[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2015, 2015: 851863.
- [129] 邓斯凯, 毛弋. 基于量子人工蜂群算法的配电网多目标优化重构[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, 44(2): 80-86, 94.
- DENG Sikai, MAO Yi. Multi-objective optimal reconfiguration of distribution network based on quantum artificial bee colony algorithm[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2021, 44(2): 80-86, 94(in Chinese).
- [130] 邓吉祥, 丁晓群, 张杭, 等. 基于量子人工蜂群算法的风电场多目标无功优化[J]. *电测与仪表*, 2015, 52(3): 11-17.
- DENG Jixiang, DING Xiaoqun, ZHANG Hang, et al. Multi-objective reactive power optimization for wind farm based on quantum artificial bee colony algorithm[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2015, 52(3): 11-17(in Chinese).
- [131] YUAN Xiaohui, WANG Pengtao, YUAN Yanbin, et al. A new quantum inspired chaotic artificial bee colony algorithm for optimal power flow problem[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 100: 1-9.
- [132] SI Yupeng, WANG Rongjie, ZHANG Shiqi, et al. Configuration optimization and energy management of hybrid energy system for marine using quantum computing[J]. *Energy*, 2022, 253: 124131.
- [133] 张东寅, 王澎湃, 袁艳斌, 等. 基于改进布谷鸟算法的电力系统最优潮流计算[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(1): 200-204.
- ZHANG Dongyin, WANG Pengtao, YUAN Yanbin, et al. An improved cuckoo search algorithm for optimal power flow problem[J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(1): 200-204(in Chinese).
- [134] MAHDI F P, VASANT P, KALLIMANI V, et al. Quantum-inspired computational intelligence for economic emission dispatch problem[EB/OL]. [2022-09-25]. <https://www.igi-global.com/gateway/chapter/179402>.
- [135] 陈光宇, 何健, 施蔚锦, 等. 基于量子混合蛙跳算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(5): 36-41, 46.
- CHEN Guangyu, HE Jian, SHI Weijin, et al. Reactive power optimization in distribution network with distributed generators based on quantum shuffled frog

- leaping algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(5): 36-41, 46(in Chinese).
- [136] BODHA K D, YADAV V K, MUKHERJEE V. Formulation and application of quantum-inspired tidal firefly technique for multiple-objective mixed cost-effective emission dispatch[J]. Neural Computing and Applications, 2020, 32(13): 9217-9232.
- [137] SHAREEF H, IBRAHIM A A, SALMAN N, et al. Power quality and reliability enhancement in distribution systems via optimum network reconfiguration by using quantum firefly algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 58: 160-169.
- [138] LI Mingwei, GENG Jing, WANG Shumei, et al. Hybrid chaotic quantum bat algorithm with SVR in electric load forecasting[J]. Energies, 2017, 10(12): 2180.
- [139] RUGEMA F X, YAN Gangui, MUGEMANYI S, et al. A cauchy-gaussian quantum-behaved bat algorithm applied to solve the economic load dispatch problem[J]. IEEE Access, 2021, 9: 3207-3228.
- [140] MAHDI F P, VASANT P, ABDULLAH-AL-WADUD M, et al. Quantum-behaved bat algorithm for many-objective combined economic emission dispatch problem using cubic criterion function[J]. Neural Computing and Applications, 2019, 31(10): 5857-5869.
- [141] 刘超, 何正友, 杨健维. 基于量子神经网络的电网故障诊断算法[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 56-60.
- LIU Chao, HE Zhengyou, YANG Jianwei. A quantum neural network based fault diagnosis algorithm for power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 56-60(in Chinese).
- [142] 王淞瑶, 张智晟. 基于量子加权 GRU 神经网络的电力系统短期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(1): 1-7.
- WANG Songyao, ZHANG Zhisheng. Short-term load forecasting of power system based on quantum weighted GRU neural network[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(1): 1-7(in Chinese).
- [143] ZHANG Xuan, HAO Qing, QU Wenjie, et al. Electricity price forecasting method based on quantum immune optimization BP neural network algorithm[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). Chongqing, China: IEEE, 2021.
- [144] 李岩, 滕云, 苑舜, 等. 绝缘子覆雪闪络特性及其改进量子神经网络的预测模型[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2725-2732.
- LI Yan, TENG Yun, YUAN Shun, et al. Study on snow covered insulator flashover characteristics and its improved QNN prediction model[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2725-2732(in Chinese).
- [145] GANJEFAR S, TOFIGHI M, KARAMI H. Fuzzy wavelet plus a quantum neural network as a design base for power system stability enhancement[J]. Neural Networks, 2015, 71: 172-181.
- [146] 黄小庆, 杨夯, 陈颢, 等. 基于 LCC 和量子遗传算法的电动汽车充电桩优化规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 176-182.
- HUANG Xiaoqing, YANG Hang, CHEN Jie, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations based on life cycle cost and quantum genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 176-182(in Chinese).
- [147] 赵坚鹏, 宋洁莹, 许建中, 等. 静止同步串联补偿器的优化选址定容方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1941-1948.
- ZHAO Jianpeng, SONG Jieying, XU Jianzhong, et al. Locating and sizing optimization of static synchronous series compensator[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1941-1948(in Chinese).
- [148] 刘红文, 张葛祥. 基于改进量子遗传算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 35-38, 50.
- LIU Hongwen, ZHANG Gexiang. A reactive power optimization method based on improved quantum-inspired genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 35-38, 50(in Chinese).
- [149] 于艾清, 刘滔. 基于自适应量子遗传算法的电力系统机组组合问题[J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(1): 24-28, 34.
- YU Aiqing, LIU Tao. Research on unit commitment problem in power system based on adaptive quantum genetic algorithm[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2015, 31(1): 24-28, 34(in Chinese).
- [150] 马速良, 马会萌, 蒋小平, 等. 基于 Bloch 球面的量子遗传算法的混合储能系统容量配置[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 592-599.
- MA Suliang, MA Huimeng, JIANG Xiaoping, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system based on bloch spherical quantum genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 592-599(in Chinese).
- [151] 董泽, 黄宇, 韩璞. 量子遗传算法优化 RBF 神经网络及其在热工辨识中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 99-104.
- DONG Ze, HUANG Yu, HAN Pu. Thermal process identification with radial basis function network based on quantum genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 99-104(in Chinese).
- [152] YANG Jianlin, JI Yuan, GUO Mingxing, et al. Research on the optimisation strategy of short-circuit current limitation based on quantum genetic algorithm[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 3270-3275.

- [153] YANG Xiyun, YANG Yuwei, LIU Yuqi, et al. A reliability assessment approach for electric power systems considering wind power uncertainty[J]. IEEE Access, 2020, 8: 12467-12478.
- [154] VLACHOGIANNIS J G, ØSTERGAARD J. Reactive power and voltage control based on general quantum genetic algorithms[J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36(3): 6118-6126.
- [155] CHATURVEDI D K, YADAV V. Forecasting of solar power using quantum GA-GNN[J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 128(3): 15-19.
- [156] 魏振华, 郑亚锋, 高宇峰, 等. 基于差分 QPSO 的多能源集线器系统优化调度[J]. 计算机仿真, 2021, 38(8): 123-128, 235.
WEI Zhenhua, ZHENG Yafeng, GAO Yufeng, et al. Optimal scheduling of multi-energy hub system based on differential QPSO algorithm[J]. Computer Simulation, 2021, 38(8): 123-128, 235(in Chinese).
- [157] 马玲, 于青, 刘刚, 等. 基于量子差分进化算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 39-43.
MA Ling, YU Qing, LIU Gang, et al. Power system reactive power optimization based on quantum DE algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 39-43(in Chinese).
- [158] WANG Congjiao, WANG Xihuai, XIAO Jianmei, et al. Fault reconfiguration of shipboard power system based on triple quantum differential evolution algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Science), 2016, 21(4): 433-442.
- [159] 张南阳, 熊国江, 陈锦龙, 等. 含风电电力系统机组组合的量子离散差分进化方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 89-96.
ZHANG Nanyang, XIONG Guojiang, CHEN Jinlong, et al. Unit commitment of the power system containing wind power via quantum discrete differential evolution [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 89-96(in Chinese).
- [160] 刘自发, 刘刚, 刘幸. 基于量子差分进化算法的分布式电源协调优化调度[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1922-1928.
LIU Zifa, LIU Gang, LIU Xing. Coordinated optimal dispatching of distributed generation based on quantum differential evolution algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1922-1928(in Chinese).



谢海鹏

在线出版日期: 2022-12-01。

收稿日期: 2022-10-14。

作者简介:

谢海鹏(1989), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统可靠性、能源互联网弹性和量子信息学在电力系统的应用, haipengxie@xjtu.edu.cn;

钱雨琦(2000), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统可靠性评估、弹性电力系统和量子通信在电力系统的应用;

付炜(1999), 男, 博士研究生, 研究方向为能源互联网弹性和量子计算在电力系统的应用;

王信(1989), 男, 博士, 副教授, 研究方向为量子光学、量子信息和超导量子电路系统;

*通信作者: 别朝红(1970), 女, 博士, 教授, 研究方向为新能源电力系统规划与可靠性评估、弹性电力系统和能源互联网, zhbic@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Status and Prospect of Quantum Informatics in Power Systems

XIE Haipeng, QIAN Yuqi, FU Wei, WANG Xin, BIE Zhaohong*

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University))

KEYWORDS: quantum informatics; new power system; quantum communication; quantum computing; quantum derivative algorithm

The new power system faces increasing uncertainty and complicated operation mechanism, resulting from the penetration of renewable energy and power electronics. The advanced information technology is expected to alleviate the situation by facilitating the reliable acquisition, safe transmission, and efficient processing of information. As quantum informatics has unique advantages in secure communication and efficient computing, it probably plays a key supporting role in the development of new power systems.

This paper reviewed the status quo of the application of quantum informatics in power systems from two fields, namely quantum communication and quantum computing. The security of quantum communication depends on fundamental properties of quantum mechanics and any eavesdropper can be detected by both sides of the communication. The feasibility of quantum encryption communication technologies in new power systems is analyzed, and the status quo of quantum communication in power systems is generalized into four aspects: long-distance information transmission, multi-user communication,

unified standards, and specialized platforms.

Quantum computing has the potential to outperform classical computing because of quantum parallelism and cunning algorithms based on quantum mechanics. At present, quantum algorithms and quantum derivative algorithms have been applied to power flow calculation, unit combination, fault detection and diagnosis, stability evaluation, operation control, optimization planning, and other fields as shown in Fig. 1. The basic principles of quantum computing methods and their research status in power systems are summarized from the aspects of mathematical attributes as linear algebraic operations, optimization problem solving, machine learning, and parameter estimation.

The application of quantum informatics in power systems has just started, and there is a wide range of research gaps to fill. In the future, it is necessary to keep focusing on core technology research, promoting the practical and standardized work of quantum communication, and strengthening the construction of dedicated quantum computing infrastructure in power systems, to achieve carbon neutrality and maintain energy security.

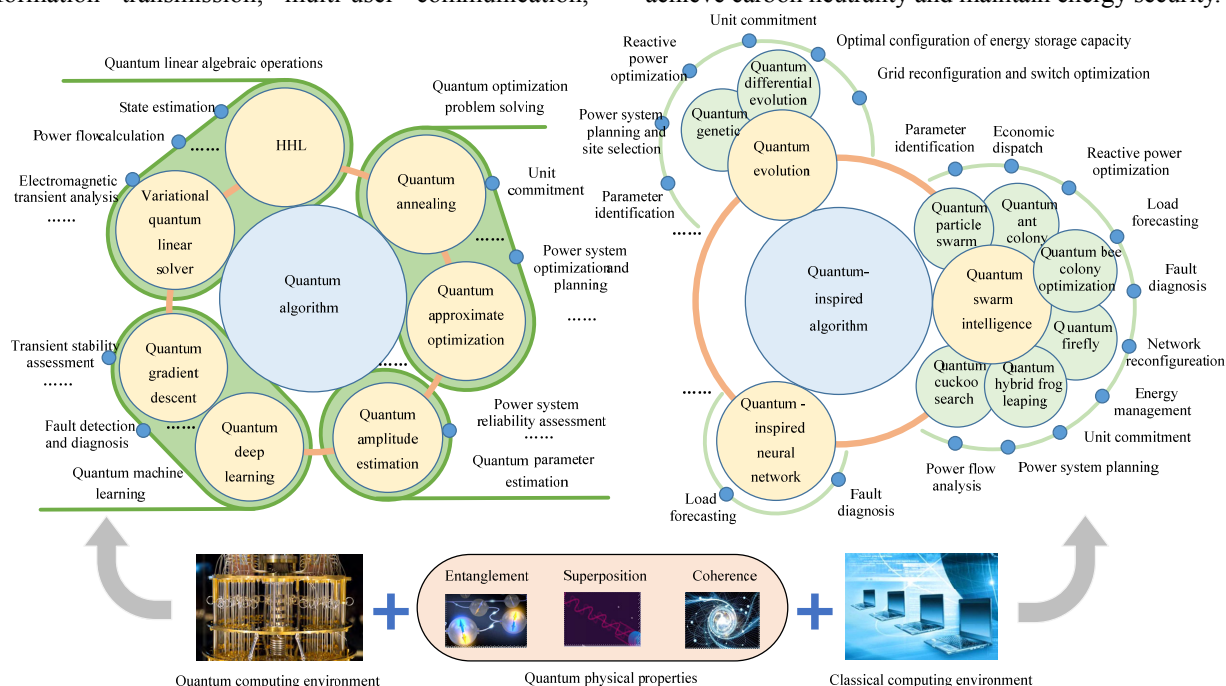


Fig. 1 Exploratory research on quantum computing in power systems